

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PAULA DEBIASI

DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIAS DE CALIBRAÇÃO DE UMA CÂMARA
DIGITAL DE BAIXO CUSTO INTEGRADA COM UM SISTEMA LIDAR

CURITIBA
2012

PAULA DEBIASI

DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIAS DE CALIBRAÇÃO DE UMA CÂMARA
DIGITAL DE BAIXO CUSTO INTEGRADA COM UM SISTEMA LIDAR

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Edson A. Mitishita

Curitiba
2012

Debiasi, Paula

Desenvolvimento de metodologias de calibração de uma câmara digital de baixo custo integrada com um sistema lidar / Paula Debiasi. – Curitiba, 2012.

193 f. : il.; tab.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

Orientador: Edson A. Mitishita

1. Câmeras fotográficas digitais - Calibração. 2. Fotogrametria aérea. I. Mitishita, Edson Aparecido. II. Título.

CDD 526.982

TERMO DE APROVAÇÃO

PAULA DEBIASI

*"DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIAS DE CALIBRAÇÃO DE UMA CÂMARA
DIGITAL DE BAIXO CUSTO INTEGRADA COM UM SISTEMA LIDAR"*

Tese nº 82 aprovada como requisito parcial do grau de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:



Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita
Departamento de Geomática, UFPR


Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli
Universidade Estadual Paulista, UNESP


Dr.ª Ana Paula Baungarten Kersting
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC


Prof. Dr. Anselmo Chaves Neto
Departamento de Estatística, UFPR


Prof. Dr. Quintino Dalmolin
Departamento de Geomática, UFPR


Prof. Dr. Alvaro Muriel Lima Machado
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 24 de setembro de 2012.

*aos meus pais Cleusa e João: meu firmamento
ao Carlos: meu amor, meu amigo
dedico.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

Ao Prof. Dr. Edson A. Mitishita pela dedicação e pelos valiosos ensinamentos durante esta jornada.

À Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão de uma bolsa de estudos no período de março de 2008 até agosto de 2009.

Ao Lactec – Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento e a Fiducial Engenharia e Aerolevantamentos Ltda., em nome dos engenheiros Fabiano e Marlo, pela disponibilização das fotografias aéreas e dos dados LIDAR para a realização dos experimentos desta pesquisa.

À UFRRJ e aos meus colegas do Departamento de Engenharia pelo apoio e incentivo.

Aos professores, funcionários e colegas do CPGCG da UFPR. Em especial aos colegas do laboratório de Fotogrametria. Ao Marcis pela minuciosa revisão desta tese e ao João Côrtes pelo especial auxílio em parte do trabalho de campo.

Aos meus fiéis escudeiros de campo: Carlos e Arthur meu muito obrigada pela paciência, disponibilidade e carinho de vocês.

*There's nothing you can know that isn't known
Nothing you can see that isn't shown
Nowhere you can be that isn't where you're meant to be
It's easy
All you need is love*

The Beatles

RESUMO

O conhecimento dos parâmetros que definem a geometria interna de uma câmara é fundamental em trabalhos fotogramétricos, principalmente quando são utilizadas câmaras que não foram originalmente projetadas para estes propósitos. É importante que a calibração da câmara seja realizada em condições técnicas e ambientais similares às do aerolevantamento. Este trabalho teve como objetivo investigar diferentes metodologias de calibração aérea de uma câmara digital de baixo custo integrada fisicamente com um sistema LIDAR. As metodologias de calibração aérea empregadas tiveram como principal finalidade prover um aumento na exatidão e otimização dos trabalhos fotogramétricos realizados com a integração destes sensores. Foram adotadas duas abordagens de calibração aérea: baseada em um campo de prova e em serviço. As metodologias de calibração, baseadas no campo de prova, visaram a determinação de parâmetros de orientação interior com estabilidade geométrica e que pudessem ser utilizados em trabalhos fotogramétricos independentes de calibrações em serviço. Nestes experimentos foram avaliados o impacto do uso de faixas de voo cruzadas e de fotografias tomadas com diferentes alturas de voo. A metodologia de calibração em serviço se baseou no uso de dados provenientes do próprio sistema fotogramétrico empregado. Foi desenvolvido um método para a extração de coordenadas altimétricas, de detalhes fotoidentificáveis, dos dados do levantamento LIDAR. Estes pontos, juntamente com as coordenadas das estações de exposição da câmara, foram utilizados como apoio no processo de calibração em serviço. Os resultados obtidos em experimentos de aerotriangulação, empregando os parâmetros de orientação interior determinados nas calibrações áreas e em uma calibração terrestre, demonstraram que a exatidão altimétrica dos processamentos utilizando as coordenadas das estações de exposição da câmara é mais dependente da qualidade dos parâmetros empregados do que a planimétrica. Foi verificado, pelos resultados obtidos nas calibrações em serviço, que para atingir as exatidões esperadas, é necessário o emprego de ao menos dois pontos de apoio planialtimétrico em conjunto com os pontos de apoio altimétrico extraídos da nuvem de pontos LIDAR. Entretanto, os experimentos demonstraram que esta metodologia propiciou maior exatidão do que os processamentos de aerotriangulação com o emprego de parâmetros de orientação interior determinados no campo de prova.

Palavras-chave: calibração aérea. calibração em serviço. câmara digital de baixo custo. campo de prova. georreferenciamento direto.

ABSTRACT

Knowledge of the internal camera geometry is fundamental in photogrammetric works, especially when the cameras were not originally designed for these purpose. It is important that the camera calibrations are performed under the same techniques and environmental conditions of the aerial survey. The aim of this doctoral thesis is to investigate different methodologies for aerial camera calibration of the low cost camera physically integrated with LIDAR system. The main purpose of the calibration methodologies was to improve accuracy and optimize photogrammetric works using the integrated sensors. Two calibration approaches were adopted: based on a test field and on-the-job. The calibration methodologies based on the test field aimed to the determination of interior orientation parameters with geometric stability and that could be used in photogrammetric works without on-the-job calibration. The impact of cross strips and different flight heights were analyzed in these tests. The on-the-job calibration was performed with the own photogrammetric system data. It was developed a method to extract vertical coordinates of punctual details of the LIDAR data. The vertical coordinates points and the camera station's positions were used as control points in the on-the-job calibration. The obtained results showed that the vertical accuracy of the aerotriangulation supported by camera station's position, using the interior orientation parameters from aerial calibrations and terrestrial calibration, is more dependent of the quality of the parameters than the planimetric accuracy. The results of on-the-job calibrations showed that to attain the expected accuracy it is required the use of at least two control points combined with the vertical control points extracted from the LIDAR data. However, the results demonstrated that this methodology provide higher accuracy than the aerotriangulations process using interior orientation parameters determined in the test field.

Key-words: aerial calibration. on-the-job calibration. low cost digital camera. test field. direct georeferencing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 01 - GEOMETRIA DA PERSPECTIVA CENTRAL.....	35
FIGURA 02 - EFEITO DA DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA	37
FIGURA 03 - EFEITO DA DISTORÇÃO DESCENTRADA	38
FIGURA 04 - PARA DIFERENTES ALTURAS DE VOO E DISTÂNCIAS FOCALIS A MESMA ESCALA DE VOO PODE SER OBTIDA	41
FIGURA 05 - CAMPOS MISTOS PERMITEM SEPARAR A DISTÂNCIA FOCAL DA ALTURA DE VOO	43
FIGURA 06 - CAMPO DE PROVA EMPREGADO NO MÉTODO DOS CAMPOS MISTOS.....	44
FIGURA 07: MÉTODO DAS CÂMARAS CONVERGENTES	45
FIGURA 08 - FLUXOGRAMA DE PROCESSAMENTOS DOS DADOS LIDAR.....	52
FIGURA 09 - DISPOSIÇÃO LASER/INS, CÂMARA E RECEPTOR GNSS NA AERONAVE	58
FIGURA 10 - SISTEMAS DE REFERÊNCIA ENVOLVIDOS NO INS.....	61
FIGURA 11 - SISTEMA DE COORDENADAS DE IMAGEM (a) SISTEMA DE COORDENADAS DOS SENSORES USADO NA NAVEGAÇÃO (b).....	61
FIGURA 12 - DESALINHAMENTOS e_x , e_y , e_z ENTRE O INS E A CÂMARA.....	64
FIGURA 13 - CÂMARA KODAK DCS Pro SLR/c.....	67
FIGURA 14 - SISTEMA LIDAR ALTM 2050.....	68
FIGURA 15 - PONTOS PRÉ-SINALIZADOS DO CAMPO DE PROVA	69
FIGURA 16 - SISTEMA LIDAR ALTM 2050 E CÂMARA DCS Pro SLR/c INSTALADOS NA MESMA PLATAFORMA	71
FIGURA 17 - CONFIGURAÇÃO DO BLOCO FOTOGRAMÉTRICO DO CAMPO DE PROVA.....	72
FIGURA 18 - CONFIGURAÇÃO DO BLOCO FOTOGRAMÉTRICO DE TELÊMACO BORBA.....	75
FIGURA 19 - FLUXO DAS METODOLOGIAS PROPOSTAS	76
FIGURA 20 - CAMPO DE CALIBRAÇÃO TERRESTRE	77
FIGURA 21 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PARA EXTRAÇÃO DE APOIO ALTIMÉTRICO DOS DADOS DO SISTEMA LIDAR	81
FIGURA 22 - DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS PRÉ-SINALIZADOS UTILIZADOS COMO APOIO E COMO VERIFICAÇÃO NAS CALIBRAÇÕES AÉREAS.....	92
FIGURA 23 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL.....	96

FIGURA 24 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL	96
FIGURA 25 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO COM FAIXAS CRUZADAS.....	101
FIGURA 26 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO COM FAIXAS CRUZADAS ...	102
FIGURA 27 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL E DUAS ALTURAS DE VOO	106
FIGURA 28 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL E DUAS ALTURAS DE VOO.....	107
FIGURA 29 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CA COM FOTOGRAFIAS DE UM VOO COM DUAS ALTURAS E FAIXAS CRUZADAS	110
FIGURA 30 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CA COM FOTOGRAFIAS DE UM VOO COM DUAS ALTURAS E FAIXAS CRUZADAS.....	111
FIGURA 31 - POSIÇÃO DO PP DETERMINADA NA CALIBRAÇÃO TERRESTRE E NAS CALIBRAÇÕES AÉREAS	112
FIGURA 32 - CURVAS DA DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA DA CT E DAS CALIBRAÇÕES AÉREAS	112
FIGURA 33 - a) EQM PLANIMÉTRICO DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO b) EQM ALTIMÉTRICO DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DAS CALIBRAÇÕES AÉREAS	115
FIGURA 34 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CA COM UM PONTO DE APOIO	118
FIGURA 35 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CA COM UM PONTO DE APOIO	119
FIGURA 36 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CA UTILIZANDO DOIS PONTOS DE APOIO	122
FIGURA 37 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CA UTILIZANDO DOIS PONTOS DE APOIO	123
FIGURA 38 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO DO CAMPO DE PROVA	127
FIGURA 39 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO DO CAMPO DE PROVA.....	127
FIGURA 40 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO DO CAMPO DE PROVA E 1 PONTO PLANIALTIMÉTRICO	131

FIGURA 41 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CALIBRAÇÃO AÉREA UTILIZANDO PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO DO CAMPO DE PROVA E 1 PONTO PLANIALTIMÉTRICO	131
FIGURA 42 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO DO CAMPO DE PROVA E 2 PONTOS PLANIALTIMÉTRICOS	135
FIGURA 43 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO DO CAMPO DE PROVA E 2 PONTOS PLANIALTIMÉTRICOS.....	135
FIGURA 44 - CURVAS DA DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA DETERMINADAS NA CA1 E NAS CA COM NÚMERO MÍNIMO DE APOIO E APOIO ALTIMÉTRICO	137
FIGURA 45 - POSIÇÃO DO PP DETERMINADA NA CA1 E NAS CA COM NÚMERO MÍNIMO DE APOIO E PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO	138
FIGURA 46 - a) EQM PLANIMÉTRICO DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO b) EQM ALTIMÉTRICO DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CA1 E NAS CA COM NÚMERO MÍNIMO DE APOIO E PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO	139
FIGURA 47 - DIFERENÇAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS PRÉ-SINALIZADOS	141
FIGURA 48 - DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO EXTRAÍDOS DA NUVEM DE PONTOS LIDAR NAS FOTOGRAFIAS TOMADAS A 1.000M	141
FIGURA 49 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO.....	144
FIGURA 50 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO.....	145
FIGURA 51 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CS COM 1 PONTO DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO.....	149
FIGURA 52 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CS COM 1 PONTO DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO.....	149
FIGURA 53 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CS COM 2 PONTOS DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO	153
FIGURA 54 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CS COM 2 PONTOS DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO	153
FIGURA 55 - CURVAS DA DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA DETERMINADAS NA CA1 E NAS CALIBRAÇÕES EM SERVIÇO.....	156
FIGURA 56 - POSIÇÃO DO PP DETERMINADA NA CA1 E NAS CALIBRAÇÕES EM SERVIÇO.....	156
FIGURA 57 - a) EQM PLANIMÉTRICO DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO b) EQM ALTIMÉTRICO DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DOS EXPERIMENTOS CA1, CS1, CS2 E CS3	157
FIGURA 58 - a) EQM PLANIMÉTRICO DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO b) EQM ALTIMÉTRICO DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DOS EXPERIMENTOS CA6 E CS3	157

FIGURA 59 - DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE APOIO E VERIFICAÇÃO UTILIZADOS NOS PROCESSAMENTOS DE AEROTRIANGULAÇÃO DO BLOCO DE TELÊMACO BORBA	159
FIGURA 60 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA AEROTRIANGULAÇÃO COM POI DA CT.....	161
FIGURA 61 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA AEROTRIANGULAÇÃO COM POI DA CT	162
FIGURA 62 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DAS AEROTRIANGULAÇÕES COM POI DAS CA	165
FIGURA 63 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DAS AEROTRIANGULAÇÕES COM POI DAS CA	166
FIGURA 64 - CURVAS DA DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA DA CA1 E CST....	168
FIGURA 65 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CS DE TELÊMACO BORBA	170
FIGURA 66 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CS DE TELÊMACO BORBA	171
FIGURA 67 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CA DE TELÊMACO BORBA	175
FIGURA 68 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CA DE TELÊMACO BORBA	175

LISTA DE QUADROS

QUADRO 01 - DEPENDÊNCIA LINEAR ENTRE PARES DE COEFICIENTES	40
QUADRO 02 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DA UTILIZAÇÃO INDEPENDENTE DE DADOS FOTOGRAFAMÉTRICOS E DADOS DO SISTEMA LIDAR.....	55
QUADRO 03 - CARACTERÍSTICAS DAS DIFERENTES SOLUÇÕES DE GEORREFERENCIAMENTO DE IMAGENS	57
QUADRO 04 - ESPECIFICAÇÕES DO SISTEMA LIDAR ALTM 2050	68

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 - VETOR ENTRE A CÂMARA E O ESPELHO (BRAÇO)	71
TABELA 02 - POI DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO TERRESTRE	89
TABELA 03 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CALIBRAÇÃO TERRESTRE	89
TABELA 04 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO TERRESTRE.....	90
TABELA 05 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE DETERMINADOS NA CT	90
TABELA 06 - POI DETERMINADOS NA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL.....	93
TABELA 07 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CA COM FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL	94
TABELA 08 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL.....	94
TABELA 09 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE DETERMINADOS NA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL.....	95
TABELA 10 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CA COM FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL	95
TABELA 11 - TESTES DE HIPÓTESE PARA AS EXATIDÕES DA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL.....	97
TABELA 12 - POI DETERMINADOS NA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO COM FAIXAS CRUZADAS.....	98
TABELA 13 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO COM FAIXAS CRUZADAS.....	99
TABELA 14 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO COM FAIXAS CRUZADAS.....	99
TABELA 15 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE DETERMINADOS NA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO COM FAIXAS CRUZADAS.....	100
TABELA 16 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO COM FAIXAS CRUZADAS	101
TABELA 17 - TESTES DE HIPÓTESE PARA AS EXATIDÕES DA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO COM FAIXAS CRUZADAS.....	102
TABELA 18 - POI DETERMINADOS NA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL COM DUAS ALTURAS DE VOO	103
TABELA 19 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL COM DUAS ALTURAS DE VOO	104

TABELA 20 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL COM DUAS ALTURAS DE VOO	105
TABELA 21 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE DETERMINADOS NA CA COM FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL COM DUAS ALTURAS DE VOO.....	105
TABELA 22 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CA COM FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL E DUAS ALTURAS DE VOO	106
TABELA 23 - TESTES DE HIPÓTESE PARA AS EXATIDÕES DA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL E DUAS ALTURAS DE VOO.....	107
TABELA 24 - POI DETERMINADOS NA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO COM DUAS ALTURAS DE VOO E FAIXAS CRUZADAS	108
TABELA 25 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO COM DUAS ALTURAS DE VOO E FAIXAS CRUZADAS.....	109
TABELA 26 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS COM DUAS ALTURAS DE VOO E FAIXAS CRUZADAS	109
TABELA 27 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE NA CA COM FOTOGRAFIAS DE DUAS ALTURAS DE VOO E FAIXAS CRUZADAS	110
TABELA 28 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CA COM FOTOGRAFIAS DE DIFERENTES ALTURAS DE VOO E FAIXAS CRUZADAS	110
TABELA 29 - TESTES DE HIPÓTESE PARA AS EXATIDÕES DA CA COM FOTOGRAFIAS DE DUAS ALTURAS DE VOO E FAIXAS CRUZADAS.....	111
TABELA 30 - POI DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO TERRESTRE E NAS CALIBRAÇÕES AÉREAS	112
TABELA 31 - POI DETERMINADOS NA CA COM UM PONTO DE APOIO.....	115
TABELA 32 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CA COM UM PONTO DE APOIO	116
TABELA 33 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CA COM UM PONTO DE APOIO	117
TABELA 34 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE DETERMINADOS NA CA COM UM PONTO DE APOIO.....	117
TABELA 35 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CA COM UM PONTO DE APOIO	117
TABELA 36 - TESTES DE HIPÓTESE PARA AS EXATIDÕES PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS DA CA COM UM PONTO DE APOIO	119
TABELA 37 - POI DETERMINADOS DA CA UTILIZANDO DOIS PONTOS DE APOIO.....	120

TABELA 38- RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CA COM DOIS PONTOS DE APOIO	121
TABELA 39 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CA COM DOIS PONTOS DE APOIO	121
TABELA 40 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE DETERMINADOS NA CA UTILIZANDO DOIS PONTOS DE APOIO	121
TABELA 41 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CA COM DOIS PONTOS DE APOIO	122
TABELA 42 - TESTES DE HIPÓTESE PARA AS EXATIDÕES PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS NA CA COM DOIS PONTOS DE APOIO	123
TABELA 43 - POI DETERMINADOS DA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O CAMPO DE PROVA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO	124
TABELA 44 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O CAMPO DE PROVA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO	125
TABELA 45 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O CAMPO DE PROVA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO	125
TABELA 46 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O CAMPO DE PROVA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO	126
TABELA 47 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O CAMPO DE PROVA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO	126
TABELA 48 - TESTES DE HIPÓTESE PARA AS EXATIDÕES DA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO DO CAMPO DE PROVA.....	128
TABELA 49 - POI DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O CAMPO DE PROVA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO E 01 APOIO PLANIALTIMÉTRICO	129
TABELA 50 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O CAMPO DE PROVA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO E 01 APOIO PLANIALTIMÉTRICO	129
TABELA 51 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O CAMPO DE PROVA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO E 01 APOIO PLANIALTIMÉTRICO.....	130
TABELA 52 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O CAMPO DE PROVA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO E 01 APOIO PLANIALTIMÉTRICO	130
TABELA 53 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CALIBRAÇÃO AÉREA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO E 1 PLANIALTIMÉTRICO	130
TABELA 54 - TESTES DE HIPÓTESE PARA AS EXATIDÕES DA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICOS DO CAMPO DE PROVA E 1 PLANIALTIMÉTRICO	132

TABELA 55 - POI DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O CAMPO DE PROVA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO E 02 PONTOS DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO	133
TABELA 56 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O CAMPO DE PROVA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO E 02 APOIO PLANIALTIMÉTRICO	133
TABELA 57 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O CAMPO DE PROVA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO E 02 PLANIALTIMÉTRICO	134
TABELA 58 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O CAMPO DE PROVA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO E 02 APOIO PLANIALTIMÉTRICO	134
TABELA 59 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICA E ALTIMÉTRICA DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CALIBRAÇÃO COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO E 2 PLANIALTIMÉTRICO	135
TABELA 60 - TESTES DE HIPÓTESE PARA AS EXATIDÕES PLANIMÉTRICA E ALTIMÉTRICA NA CALIBRAÇÃO AÉREA UTILIZANDO PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO DO CAMPO DE PROVA E 2 APOIO PLANIALTIMÉTRICOS	136
TABELA 61 - POI DETERMINADOS NAS CALIBRAÇÕES COM MÍNIMO DE APOIO E APOIO ALTIMÉTRICO	137
TABELA 62 - ALTIMETRIA DOS PONTOS PRÉ-SINALIZADOS LEVANTADAS POR GNSS E EXTRAÍDAS DA NUVEM DE PONTOS LIDAR	140
TABELA 63 - POI DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO	142
TABELA 64 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO	142
TABELA 65 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO	143
TABELA 66 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO	143
TABELA 67 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO	144
TABELA 68 - TESTES DE HIPÓTESE PARA AS EXATIDÕES PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS DA CS	145
TABELA 69 - POI DETERMINADOS NA CS COM 1 PONTO DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO	146
TABELA 70 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CS COM 1 PONTO DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO	147
TABELA 71 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CS COM 1 PONTO DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO	147
TABELA 72 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE DETERMINADOS NA CS COM 1 PONTO DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO	148

TABELA 73 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CS COM 1 PONTO DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO.....	148
TABELA 74 - TESTES DE HIPÓTESE PARA AS EXATIDÕES PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS DA CS COM 1 PONTO DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO.....	149
TABELA 75 - POI DETERMINADOS NA CS COM 2 PONTOS DE APOIO PLANIMÉTRICO	151
TABELA 76 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CS COM 2 PONTOS DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO.....	151
TABELA 77 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CS COM 2 PONTOS DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO.....	152
TABELA 78 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE DETERMINADOS NA CS COM 2 PONTOS DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO.....	152
TABELA 79 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CS COM 2 PONTOS DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO	152
TABELA 80 - TESTES DE HIPÓTESE PARA AS EXATIDÕES DA CS COM DOIS PONTOS DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO.....	154
TABELA 81 - POI DETERMINADOS NA CA1 E NAS CALIBRAÇÕES EM SERVIÇO	155
TABELA 82 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA AEROTRIANGULAÇÃO COM POI DA CALIBRAÇÃO TERRESTRE	160
TABELA 83 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA AEROTRIANGULAÇÃO COM POI DA CT.....	160
TABELA 84 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DOS PROCESSAMENTOS DE AEROTRIANGULAÇÃO COM POI DAS CA	163
TABELA 85 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NOS PROCESSAMENTOS DE AEROTRIANGULAÇÃO COM POI DAS CA	163
TABELA 86 - POI DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO DE TELÊMACO BORBA	167
TABELA 87 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO DE TELÊMACO BORBA	168
TABELA 88 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CS DE TELÊMACO BORBA	169
TABELA 89 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE DETERMINADOS NA CS DE TELÊMACO BORBA	169
TABELA 90 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CS DE TELÊMACO BORBA	169
TABELA 91 - TESTES DE HIPÓTESE PARA AS EXATIDÕES OBTIDAS NA CS DE TELÊMACO BORBA	171
TABELA 92 - POI DETERMINADOS NA CA DE TELÊMACO BORBA	172
TABELA 93 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CA DE TELÊMACO BORBA	173

TABELA 94 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CA DE TELÊMACO BORBA	174
TABELA 95 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE DETERMINADOS NA CA DE TELÊMACO BORBA	174
TABELA 96 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CA DE TELÊMACO BORBA	174
TABELA 97 - TESTES DE HIPÓTESE PARA AS EXATIDÕES OBTIDAS NA CALIBRAÇÃO AÉREA DE TELÊMACO BORBA	176
TABELA 98- TESTES DE HIPÓTESE PARA VERIFICAÇÃO DE TENDÊNCIA NAS COMPONENTES X, Y E Z DAS CA 1,2,3 E 4	192
TABELA 99 - TESTES DE HIPÓTESE PARA VERIFICAÇÃO DE TENDÊNCIA NAS COMPONENTES X, Y E Z DAS CA COM MÍNIMO DE PONTOS	192
TABELA 100 - TESTES DE HIPÓTESE PARA VERIFICAÇÃO DE TENDÊNCIA NAS COMPONENTES X, Y E Z DAS CA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO ...	192
TABELA 101 - TESTES DE HIPÓTESE PARA VERIFICAÇÃO DE TENDÊNCIA NAS COMPONENTES X, Y E Z DAS CS.....	193
TABELA 102 - TESTES DE HIPÓTESE PARA VERIFICAÇÃO DE TENDÊNCIA NAS COMPONENTES X, Y E Z DAS CA DO BLOCO DE TELÊMACO BORBA.....	193

LISTA DE SIGLAS

ALTM 2050	- <i>Airborne Laser Terrain Mapper 2050</i>
CA	- Calibração Aérea
CalVal	- <i>Calibration and validation of remote sensing imagery sensors and data</i>
CCD	- <i>Charge Couple Device</i>
CMOS	- <i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
CP	- Centro Perspectivo
CPGCG	- Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
CS	- Calibração em Serviço
CT	- Calibração Terrestre
dcr	- <i>Digital Camera Raw</i>
DCS	- <i>Digital Camera Systems</i>
DIN	- <i>Deutsches Institut für Normung</i>
DN	- <i>Digital Numbers</i>
ei	- escala de imagem
EQM	- Erro Quadrático Médio
EuroDAC ²	- <i>European Digital Airborne mapping Camera Certification</i>
EuroSDR	- <i>European Spatial Data Research</i>
gl	- graus de liberdade
GNSS	- <i>Global Navigation Sattelite System</i>
GSD	- <i>Ground Sample Distance</i>
ILMB	- <i>Integrated Land Management Bureau</i>
IMU	- <i>Inertial Measurement Unit</i>
INS	- <i>Inertial Navigation System</i>
ISO	- <i>International Organization for Standartization</i>
Laser	- <i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LAIG	- Laboratório de Instrumentação Geodésica
LIDAR	- <i>Light Detection and Ranging</i>
LPS	- <i>Leica Photogrammetric Suite</i>
LSM	- <i>Least Squares Matching</i>
MDT	- Modelo Digital de Terreno

MDS	- Modelo Digital de Superfície
MDSn	- Modelo Digital de Superfície Normalizada
MMQ	- Método dos Mínimos Quadrados
MVC	- Matriz Variância-Covariância
PEC	- Padrão de Exatidão Cartográfica
POI	- Parâmetros de Orientação Interior
POE	- Parâmetros de Orientação Exterior
PP	- Ponto Principal
RBMC	- Rede Brasileira de Mapeamento Contínuo
RGB	- <i>Red, Green e Blue</i>
SAR	- <i>Synthetic Aperture Radar</i>
SIRGAS	- Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SLR	- <i>Single Lens Reflex</i>
tiff	- <i>Tag Image File Format</i>
TIN	- <i>Triangulated Irregular Network</i>
USGS	- <i>United States Geological Survey</i>
UTM	- <i>Universal Transversa de Mercator</i>
WGS 84	- <i>World Geodetic System 84</i>
VIM	- Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	24
1.1 OBJETIVO GERAL	27
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	28
1.3 JUSTIFICATIVA	28
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	29
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	30
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	30
2.2 CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS.....	31
2.2.1 Modelo Matemático Fundamental de Calibração de Câmaras.....	33
2.2.2 Métodos de Calibração.....	39
2.2.2.1 Método Estelar	42
2.2.2.2 Método dos Campos Mistos	42
2.2.2.3 Método das Câmaras Convergentes.....	44
2.2.3 Estado da arte da Calibração de Câmaras.....	46
2.3 SISTEMA LIDAR	50
2.4 INTEGRAÇÃO SISTEMA LIDAR E CÂMARA DIGITAL.....	53
2.4.1. Sistema Inercial.....	59
2.4.1.1 Sistemas Referenciais envolvidos no INS	60
2.4.2 Determinação da atitude e posição da câmara	61
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	66
3.1 MATERIAIS.....	66
3.1.1 Programas Computacionais	66
3.1.2 Equipamentos	67
3.1.3 Implantação do Campo de Prova	68
3.1.3.1 Sinalização dos alvos do campo de prova	69
3.1.3.2 Levantamento das coordenadas dos alvos pré-sinalizados	70
3.1.4 Recobrimentos Aéreos.....	70
3.1.4.1 Recobrimento Aéreo do campo de prova de Ponta Grossa	71
3.1.4.2 Recobrimento Aéreo da cidade de Telêmaco Borba.....	73
3.1.4.2.1 Levantamento de pontos fotoidentificáveis em Telêmaco Borba	74
3.2 METODOLOGIA.....	75
3.2.1 Calibração terrestre	76
3.2.2 Calibração Aérea utilizando o campo de prova	77
3.2.2.1 Calibração com fotografias de um voo convencional	78
3.2.2.2 Calibração com fotografias de um voo com faixas cruzadas.....	78
3.2.2.3 Calibração com fotografias com duas alturas de voo.....	79
3.2.2.4 Calibração com fotografias com duas alturas de voo e faixas cruzadas	79
3.2.3 Verificação da viabilidade da calibração aérea com número mínimo de pontos de apoio	79
3.2.4 Verificação da viabilidade da calibração aérea utilizando somente pontos de apoio altimétrico.....	80
3.2.5 Calibração Aérea em Serviço.....	80
3.2.5.1 Metodologia de extração de coordenadas altimétricas de pontos de passagem.....	81
3.2.6 Análise da significância dos parâmetros de orientação interior.....	82

3.2.7 Análise de precisões e exatidões obtidas nos processamentos de calibração e aerotriangulação	83
3.2.7.1 Análise de precisão do ajustamento.....	83
3.2.7.2 Análises de exatidões planimétrica e altimétrica	84
3.2.8 Validação das Metodologias de Calibração.....	86
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	88
4.1 RESULTADOS OBTIDOS NA CALIBRAÇÃO TERRESTRE	88
4.2 RESULTADOS OBTIDOS NAS CALIBRAÇÕES AÉREAS UTILIZANDO O CAMPO DE PROVA.....	91
4.2.1 Calibração aérea utilizando fotografias de um voo convencional.....	92
4.2.2 Calibração aérea utilizando fotografias de um voo com faixas cruzadas	98
4.2.3 Calibração aérea utilizando fotografias tomadas com duas alturas de voo....	103
4.2.4 Calibração com fotografias com duas alturas de voo e faixas cruzadas	108
4.2.5 Síntese dos resultados das Calibrações Aéreas	111
4.3 VERIFICAÇÃO DA VIABILIDADE DA CALIBRAÇÃO AÉREA COM NÚMERO MÍNIMO DE PONTOS DE APOIO	115
4.3.1 Calibração Aérea utilizando 1 ponto de apoio planialtimétrico	115
4.3.2 Calibração Aérea utilizando 2 pontos de apoio planialtimétrico	120
4.4 VERIFICAÇÃO DA VIABILIDADE DA CALIBRAÇÃO AÉREA UTILIZANDO PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO	124
4.4.1 Calibração Aérea com pontos de apoio altimétrico e 1 ponto de apoio planialtimétrico.....	128
4.4.2 Calibração Aérea com pontos de apoio altimétrico e 2 pontos de apoio planialtimétrico.....	132
4.4.3 Síntese dos resultados obtidos nos experimentos de calibração aérea utilizando número mínimo de pontos de apoio e pontos de apoio altimétrico.	136
4.5 RESULTADOS OBTIDOS NA CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO.....	139
4.5.1 Calibração em Serviço	142
4.5.2 Calibração em Serviço com 1 ponto de apoio planialtimétrico	146
4.5.3 Calibração em Serviço com 2 pontos de apoio planialtimétrico	150
4.5.4 Síntese dos resultados obtidos nos experimentos de calibração em serviço.	155
4.6 VALIDAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE CALIBRAÇÃO.....	158
4.6.1 Aerotriangulações empregando os POI determinados na calibração terrestre e nas calibrações aéreas	158
4.6.1.1 Aerotriangulação utilizando POI determinados na calibração terrestre	160
4.6.1.2 Aerotriangulações utilizando POI determinados nas calibrações aéreas....	162
4.6.2 Calibração em serviço do bloco fotogramétrico de Telêmaco Borba	166
4.6.3 Calibração Aérea do bloco fotogramétrico de Telêmaco Borba com somente dois pontos de apoio altimétrico.....	172
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	177
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	180
REFERÊNCIAS.....	181
ANEXOS	190
ANEXO 01 - Exemplo de arquivo do sistema LIDAR	190
APÊNDICES.....	191
APÊNDICE 01 - Análise de Tendência das Calibrações realizadas.....	191

1 INTRODUÇÃO

Os sensores utilizados para a coleta de imagens aerofotogramétricas têm passado por diversas modificações nas últimas décadas. As câmaras métricas analógicas foram quase que totalmente substituídas por câmaras métricas digitais nas aplicações de mapeamento. As vantagens de uma câmara digital quando comparada com a analógica são inúmeras, tais como facilidades operacionais, qualidade da imagem, automação de processos, entre outras. Entretanto, as câmaras métricas digitais necessitam de elevada tecnologia para obter imagens com cobertura de área no terreno equivalente à de uma câmara métrica analógica, como o uso de sensores de varredura linear ou a combinação de sensores matriciais (*multiframe*). A complexa geometria de aquisição e de processamento das imagens, aliada ao alto custo das câmaras métricas, vêm impulsionando empresas de pequeno e médio porte a buscar soluções baseadas em sistemas de imageamento digital economicamente mais acessíveis e de simples processamento.

Uma alternativa promissora empregada na Fotogrametria são as câmaras digitais não originalmente projetadas para propósitos fotogramétricos, designadas neste trabalho de câmaras de baixo custo. Pesquisas realizadas mostraram as potencialidades do uso destas câmaras em processos fotogramétricos como: verificação da estabilidade geométrica (HABIB *et al.*, 2006; HABIB *et al.*, 2008; MITISHITA *et al.*, 2009; CÔRTEZ, 2010); extração automática de feições das imagens (MACHADO, 2006); geração de ortoimagens (MARTINS, 2010; MENDONÇA JR, 2010); integração com outros sensores para o desenvolvimento de metodologias de extração de informações tridimensionais (CRAMER, 2004; SANTOS, 2005; BAZAN, 2007; RUY, 2008).

De forma geral, as câmaras de baixo custo possuem como vantagens a aquisição direta de imagens digitais, a facilidade de manuseio e processamento das imagens e o seu pequeno porte, que viabiliza a sua utilização em qualquer tipo de aeronave. Entretanto, quando comparadas às câmaras métricas digitais, estas apresentam duas importantes desvantagens: a primeira está na limitação da área de cobertura do sensor no terreno, o que acarreta maior número de imagens e pontos

de apoio num projeto de mapeamento convencional, e a segunda com a provável instabilidade nos parâmetros de orientação interior (POI).

Para garantir confiabilidade nas informações métricas extraídas de imagens provenientes de câmaras digitais de baixo custo, o processo de calibração geométrica é de fundamental importância, de forma que os POI determinados permitam a reconstrução do feixe de raios formadores da imagem. Contudo, diferenças entre as condições ambientais, como temperatura e pressão, bem como a utilização de distintas técnicas de aquisição das imagens entre os instantes da calibração e do recobrimento aéreo, podem alterar os valores dos POI, prejudicando a reconstrução tridimensional do espaço objeto. A solução é calibrar a câmara em condições mais próximas possíveis do recobrimento fotogramétrico utilizado no projeto, conforme proposto por Eisenhart (1963)¹ *apud* Andrade (2003) no trabalho que trata sobre calibração de sistemas de medida.

A utilização de um campo de prova específico para calibrações aéreas têm sido a alternativa empregada para melhorar o desempenho das calibrações, como apresentado e discutido nos trabalhos de Merchant (1980), Andrade (2003), Honkavaara *et al.* (2008) e Côrtes (2010). Outra possibilidade é a utilização de metodologias de calibração em serviço, processo que consiste na determinação dos POI com base no recobrimento aéreo utilizado no projeto de mapeamento. Entretanto, a dificuldade sempre presente foi de como proceder para minimizar as correlações entre alguns POI com parâmetros de orientação exterior (POE), correlações estas que ocorrem no processo de calibração no qual os POE de cada fotografia são considerados como incógnitas no ajustamento. Campos de prova com elevada variação altimétrica ou fotografias inclinadas foram alguns dos procedimentos empregados para contornar o problema. Atualmente, com os avanços das tecnologias baseadas na integração de sensores de posicionamento (*Global Navigation Satellite System* - GNSS) e de orientação (*Inertial Navigation System* - INS), a determinação dos POE no momento de tomada das imagens pode ser realizada pelo georreferenciamento direto.

Aproveitando-se dos mesmos avanços das tecnologias de posicionamento, observa-se uma tendência de integrar diversos sensores, em uma mesma

¹ EISENHART, C. Realistic Evaluation of the Precision and accuracy of instrument calibration system. **Journal of research of the National Bureau of Standards**. v. 67C, n.2, abr/jun, 1963.

plataforma, visando a extração de informações tridimensionais de forma mais precisa, completa e autônoma (AGUILERA, GONZÁLVES e LAHOZ, 2007; KERN, 2001; SHENK e CSATHO, 2002).

No caso de mapeamentos fotogramétricos, é crescente a integração de imagens digitais com dados de sistemas *Light Detection and Ranging* (LIDAR) (HABIB *et al.*, 2005; RÖNNHOLM *et al.*, 2007; MACHADO, 2006). O sistema LIDAR é composto pelos sensores: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (*Laser*) *scanner*, receptor de sinais GNSS e INS. Segundo Habib *et al.* (2005), os dados provenientes de câmaras digitais e de levantamentos LIDAR possuem características complementares entre si, ou seja, as desvantagens de um método podem ser compensadas por vantagens que o outro método oferece.

Estudos recentes mostram que a vasta informação tridimensional, provida pelo levantamento LIDAR, pode ser utilizada como apoio nos processamentos fotogramétricos. James *et al.* (2006) utilizou de pontos de apoio extraídos do Modelo Digital de Superfície (MDS) provido pelo sistema LIDAR em processamentos de fotografias aéreas multitemporais. Em Mitishita *et al.* (2008), as coordenadas dos centróides de edificações foram extraídas dos dados LIDAR e utilizadas como pontos de apoio no processo fotogramétrico. Santos *et al.* (2010) utilizou de pontos de apoio extraídos do MDS do LIDAR para a orientação indireta de fotografias aéreas advindas de uma câmara de baixo custo. Mitishita, Côrtes e Centeno (2011) utilizaram a imagem de intensidade e o MDS, para a extração de coordenadas tridimensionais de pontos pré-sinalizados para servirem de apoio no georreferenciamento indireto de imagens de uma câmara de baixo custo.

Dentro do contexto apresentado, o LACTEC (Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento), em uma parceria com o Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (CPGCG) da UFPR, desenvolveu um sistema de imageamento baseado na integração física de uma câmara digital de baixo custo com um sistema LIDAR, visando a obtenção simultânea de fotografias aéreas com dados *laser scanner* e ainda, a determinação dos parâmetros de posição do centro perspectivo (CP) da câmara no instante de tomada das imagens.

Pesquisas iniciais com este sistema de imageamento, realizadas por Martins (2010), mostraram a viabilidade da produção de ortoimagens classificadas pelo Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) como "classe A" na escala de 1/2.000.

Entretanto, foi admitida como sendo a provável causa de inexatidão nos processos fotogramétricos estudados a determinação dos POI ter sido realizada por procedimento de calibração terrestre. De forma a possibilitar maior exatidão aos processos fotogramétricos realizados com este sistema, a presente pesquisa visa o estabelecimento de metodologias eficientes de calibração de câmaras de baixo custo com base em recobrimentos aéreos (LIDAR e fotogramétrico realizados simultaneamente).

Duas abordagens foram seguidas, a calibração utilizando um campo de prova e a calibração em serviço. As metodologias baseadas no campo de prova tiveram como finalidade a investigação da determinação de POI geometricamente estáveis, ou seja, parâmetros que possam ser empregados em processos fotogramétricos independentes do recobrimento aéreo utilizado para a calibração. As metodologias, denominadas nesta pesquisa de calibração em serviço, referem-se às calibrações que empregaram pontos de apoio altimétrico, sendo estas coordenadas extraídas do levantamento LIDAR realizado em conjunto com o recobrimento fotogramétrico.

Todas as metodologias de calibração foram desenvolvidas a partir da disponibilidade de dados do georreferenciamento direto, de forma que as coordenadas de posição do CP da câmara fossem injuncionadas no processamento de calibração.

1.1 OBJETIVO GERAL

Considerando a constante busca pela automação dos processos e aumento na exatidão dos trabalhos fotogramétricos, esta pesquisa tem como objetivo geral a investigação de diferentes metodologias para a calibração aérea de uma câmara digital de baixo custo integrada a um sistema LIDAR.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Em vista do objetivo geral da pesquisa, os objetivos específicos são os seguintes:

- a) investigar o desempenho de métodos de calibração aérea baseados num campo de prova, com diferentes configurações de blocos fotogramétricos, visando a determinação de POI com estabilidade geométrica;
- b) estudar a viabilidade da utilização de pontos de apoio altimétrico na calibração aérea;
- c) propor uma metodologia para a extração semi-automática de coordenadas altimétricas de detalhes fotoidentificáveis, com base nas fotografias aéreas e no MDS provido pelo LIDAR;
- d) a partir de coordenadas altimétricas extraídas dos dados LIDAR, analisar o desempenho de uma metodologia de calibração em serviço empregando estes pontos como apoio;
- e) avaliar o desempenho dos POI, determinados nas calibrações utilizando o campo de prova, no processamento de um bloco fotogramétrico independente do bloco utilizado para a calibração;
- f) comparar as exatidões provenientes das metodologias de calibração utilizando o campo de prova e da calibração em serviço;

1.3 JUSTIFICATIVA

Durante os últimos anos, as áreas mais pesquisadas e desenvolvidas na aerofotogrametria referem-se ao uso de sensores imageadores digitais e a determinação direta dos POE (IP, 2005). Com relação à primeira área, destaca-se a crescente utilização de câmaras digitais de pequeno e médio formato (ou câmaras de baixo custo), de sensores multi e hiperespectrais e ainda de sensores ativos como o LIDAR e o Radar de Abertura Sintética (*Synthetic Aperture Radar* - SAR). A medição direta dos POE fornece uma grande mudança em aplicações de mapeamento aéreo, reduzindo significativamente a quantidade necessária de pontos de apoio no terreno para o processamento de aerotriangulação e ainda, no caso da calibração aérea, possibilita que as correlações entre POI e POE sejam atenuadas.

Este trabalho segue estas tendências, uma vez que a integração da câmara de baixo custo com o sistema LIDAR viabilizou o georreferenciamento direto das imagens para a realização de procedimentos fotogramétricos integrados com dados *laser scanner*.

Pesquisas realizadas com o sistema de imageamento do LACTEC apontaram a necessidade de POI que permitissem a recuperação da geometria projetiva para o instante de tomada das imagens. Fundamentada nesta recomendação, esta pesquisa foi conduzida com o propósito de possibilitar maiores exatidões aos trabalhos fotogramétricos realizados com este sistema de imageamento com base em novos POI, determinados por meio de metodologias de calibração que considerassem a configuração do sistema empregado, justificando a proposta deste trabalho de doutorado.

Desta condição confirmam-se as abordagens estabelecidas para a realização da presente pesquisa, fundamentadas na utilização das coordenadas do CP da câmara determinadas pela integração física da câmara com o sistema LIDAR, calibração aérea empregando um campo de prova e calibração em serviço com a utilização de pontos de apoio altimétrico com coordenadas determinadas pelo levantamento LIDAR.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos. No primeiro capítulo foi introduzida a pesquisa a ser realizada, sendo apresentada a motivação, sua importância científica e os objetivos a serem alcançados. No segundo capítulo são abordados os fundamentos teóricos de calibração de câmaras, sistema LIDAR e a integração destes sensores, sendo realizada uma análise do “estado de arte”. No capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos empregados na pesquisa, formulados com base nos trabalhos atuais relatados no capítulo 2. No capítulo 4 são relatados e discutidos os resultados obtidos pelo emprego das metodologias desenvolvidas. No capítulo 5 são apresentadas as considerações finais e recomendações para trabalhos futuros e por fim são apresentadas as referências bibliográficas que embasaram esta pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O emprego de imagens digitais, na solução de diferentes projetos de engenharia, tem sido impulsionado principalmente pelo aumento da resolução do elemento sensor das câmaras, denominado de *Charge Couple Device* (CCD) ou *Complementary Metal Oxide Semiconductor* (CMOS). Além do aumento da resolução das imagens, as facilidades operacionais e a possibilidade de automação de processos disseminaram a utilização de câmaras digitais em aplicações fotogramétricas. As câmaras digitais de quadro podem ser divididas em três classes (PETRIE, 2003; CRAMER, 2004; PETRIE; WALKER, 2007):

- câmaras de pequeno formato: são consideradas as câmaras de até 6 Megapixels. O emprego destas câmaras em aplicações aerofotogramétricas tem sido associado com receptores de sinais GNSS e sistemas INS, de forma a fornecer valores aproximados de POE. A utilização de POE aproximados em sistemas fotogramétricos possibilita a medição automática de pontos fotogramétricos além de dar suporte ao processamento de aerotriangulação. Uma das aplicações deste tipo de câmara na Fotogrametria é por meio do arranjo de diversas destas câmaras em uma mesma plataforma, para a obtenção de imagens verticais e oblíquas, possibilitando a formação de imagens de alta resolução.
- câmaras de médio formato: são consideradas as câmaras de aproximadamente 16 Megapixels. São câmaras profissionais utilizadas por fotógrafos e que são adaptadas para a utilização em recobrimentos aéreos.
- câmaras de grande formato: são consideradas as câmaras com mais de 36 Megapixels. Estas câmaras possibilitam uma maior produtividade nos projetos de mapeamento de extensas áreas pois a área de cobertura do sensor no terreno é mais extensa que as demais câmaras digitais.

Seguindo a classificação apresentada, a câmara utilizada para a realização desta pesquisa pode ser denominada como uma câmara de médio formato, pois

possui resolução de 13,5 Megapixels com formato das imagens de 3.000 x 4.500 pixels.

2.2 CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS

O termo calibração é definido no Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia (VIM) como "operação que estabelece, numa primeira etapa e sob condições especificadas, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando à obtenção de um resultado de medição a partir de uma indicação" (JOINT, 2009). Honkavaara (2008) define que a calibração é um procedimento que estabelece, sob condições específicas, os modelos e parâmetros que são necessários para relacionar as indicações de um instrumento com os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões.

No caso da calibração de câmaras podem ser consideradas a calibração radiométrica e a calibração geométrica. A calibração radiométrica consiste em determinar as características radiométricas de um sistema de imageamento (HONKAVAARA, 2008). Em outras palavras, ela permite descrever como o sensor responde em função do sinal incidente no sistema. Esta calibração pode ser feita de modo absoluto e relativo. O modo absoluto estabelece a relação entre o nível de radiância que chega ao sensor e o número digital (*digital number* - DN) gerado por este. O modo relativo consiste em determinar a diferença de resposta entre os pixels da matriz de detectores quando estes são sensibilizados por uma mesma radiância. No caso da calibração geométrica, foco desta pesquisa, o objetivo é determinar os parâmetros que permitem a reconstrução do feixe de raios que gerou a imagem.

Os novos sensores de imageamento digital possuem sistemas de aquisição de imagens com configurações bastante heterogêneas, como sistemas de varredura linear, sistemas compostos pela combinação de vários sensores de quadro e ainda, sistemas compostos por somente um sensor como as câmaras de pequeno e médio formato. Considerando as diferenças entre os novos sensores de imageamento, diversas iniciativas estão sendo realizadas para normatizar o uso e a calibração de câmaras digitais.

A *European Spatial Data Research* (EuroSDR) tem como objetivo criar uma certificação europeia (*Digital Airborne mapping Camera Certification* - EuroDAC²) referente à sistemas e padrões de obtenção, processamento e disseminação de dados espaciais. Em Cramer (2009), são apresentados os resultados de testes de calibração geométrica de câmaras métricas digitais, realizados pelo grupo de trabalho da EuroSDR. Os resultados obtidos nestes testes, utilizando diferentes sensores e métodos de calibração, demonstraram a importância da calibração da câmara ser realizada em serviço para a obtenção de maior exatidão no processamento fotogramétrico.

No ano de 2007, o instituto alemão de normatização (DIN - *Deutsches Institut für Normung*) publicou o DIN 18740-4, que apresenta especificações técnicas sobre câmaras métricas digitais, bem como sobre a operação desses equipamentos. Segundo a DIN 18740-4 a calibração geométrica e radiométrica destas câmaras deve ser realizada a cada dois anos e validada a cada ano. A recomendação é de que a validação seja realizada por meio de calibração aérea utilizando um campo de prova de alta precisão, de forma a avaliar a qualidade planimétrica e altimétrica obtida no processamento das coordenadas.

O *United States Geological Survey* (USGS) publicou em 2006 um conjunto de procedimentos e especificações para a geração e processamento de produtos baseados em sensores aerofotogramétricos digitais (JUBANSKI; ALIXANDRINI; BÄHR, 2009). Estas especificações consistem na certificação do fabricante do sensor, certificação das empresas que realizam os trabalhos fotogramétricos digitais e certificação da qualidade dos dados produzidos a partir dos sensores digitais. A certificação do fabricante considera a fabricação e calibração da câmara, sendo realizada por meio da análise de documentos referentes à câmara e visitas realizadas nas dependências do fabricante. Após a aprovação de um determinado modelo de câmara, todas as câmaras deste mesmo modelo são consideradas aptas a operar. Até outubro de 2010 os seguintes modelos de câmaras haviam sido certificados pela USGS: DSS 322, 422 e 439, da Applanix; DMC, da Z/Imaging; UltraCam D, X, Xp e XpWA, da Vexcel; ADS40, da Leica; IRIS One 50, da Pictometry e Geoscanner Build III, da Geovantage. A qualidade dos dados produzidos é realizada por meio de um conjunto de ferramentas desenvolvidas pela USGS para a análise dos resultados gerados.

No Canadá, foi criado em 2007 o *Integrated Land Management Bureau* (ILMB) que estabelece especificações e normas de calibração de câmaras de pequeno e médio formato (INTEGRATED, 2007).

Apesar das iniciativas de diversos países em normatizar a calibração de câmaras, é recomendada que esta organização seja realizada no âmbito internacional (KRESSE, 2010). O propósito da *International Organization for Standardization* (ISO 19159) denominada "*Calibration and validation of remote sensing imagery sensors and data*", ou utilizando o nome abreviado CalVal, é de normatizar a calibração e certificação de câmaras no âmbito internacional. O projeto está ainda em fase de desenvolvimento e a norma deverá ser publicada em 2012 ou 2013. Os sensores incluídos na CalVal são câmaras aéreas, LIDAR, radar imageador e sistema sonar. Além de tratar da calibração geométrica dos sensores, serão abordados fatores relacionados com a calibração radiométrica e os métodos de calibração em laboratório e em campo.

As iniciativas de normatização apresentadas demonstram a importância tanto da calibração geométrica quanto da calibração radiométrica dos sensores e ainda, observa-se que diversas destas normas aconselham a realização da calibração aérea da câmara. As normas apresentadas referem-se principalmente à câmaras de grande formato, ou seja, câmaras métricas digitais exceto pela iniciativa canadense, que normatiza a calibração de câmaras de pequeno e médio formato.

2.2.1 Modelo Matemático Fundamental de Calibração de Câmaras

A calibração geométrica de câmaras pode ser entendida como sendo a determinação de parâmetros que permitam a reconstrução do feixe de raios que gerou a imagem (ANDRADE, 2003). O propósito desta calibração é de estimar os POI; estes compreendem a distância focal da câmara (f), as coordenadas do ponto principal (x_0 e y_0) e parâmetros que permitem compensar os desvios da geometria perspectiva (HABIB; PULLIVELLI; MORGAN, 2004).

Para estabelecer o modelo matemático fundamental de calibração de câmaras torna-se necessária a definição dos principais referenciais envolvidos na formação da imagem. Em Fotogrametria, são utilizados modelos matemáticos que

relacionam as informações do sistema de coordenadas do espaço imagem com o sistema de coordenadas do espaço objeto.

Sendo as observações realizadas no negativo fotográfico, o espaço imagem pode ser definido como a região compreendida entre o ponto nodal posterior do sistema de lentes até o plano do negativo. Entretanto, se as observações forem realizadas no diapositivo, o espaço imagem pode ser definido como a região compreendida entre o ponto nodal anterior do sistema de lentes e o plano do diapositivo. O espaço objeto pode ser definido como sendo a região entre o ponto nodal anterior e a superfície física. Os sistemas de referência envolvidos nos processos fotográficos são apresentados na Figura 01.

- Sistema de coordenadas da imagem digital: é um referencial do espaço imagem. Este sistema bidimensional possui origem no centro do pixel situado no canto superior esquerdo da imagem. O eixo das abscissas (c) coincide com a primeira linha da imagem e refere-se à contagem do número de colunas. O eixo das ordenadas (l) coincide com a primeira coluna da imagem, e refere-se à contagem do número de linhas da imagem.
- Sistema de coordenadas intermediário da imagem: é um referencial do espaço imagem. O sistema bidimensional possui origem no centro geométrico da imagem. O eixo das abscissas (x) é paralelo e orientado positivamente na direção de voo. O eixo das ordenadas (y) possui orientação positiva a 90° no sentido anti-horário, a partir do eixo (x). A transformação das coordenadas de um ponto no sistema de coordenadas da imagem digital em pixel (c,l) para o sistema de coordenadas intermediário em milímetros (x,y) pode ser realizada pela Equação 01:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_c & 0 \\ 0 & -p_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c - \left(\frac{N_c - 1}{2} \right) \\ l - \left(\frac{N_l - 1}{2} \right) \end{bmatrix} \quad (01)$$

Onde p_c e p_l referem-se à dimensão do pixel em milímetros; N_c e N_l referem-se ao número total de colunas e linhas da imagem digital.

- Sistema fotogramétrico: é um referencial do espaço imagem. Este sistema tridimensional dextrógiro possui origem no CP da câmara, ou seja, no ponto nodal anterior, caso se esteja trabalhando com o diapositivo, ou no ponto nodal posterior se for utilizado o negativo. Os eixos x' e y' são paralelos e com mesma orientação que os eixos do sistema de coordenadas da imagem em milímetros (x,y). O eixo z' é perpendicular ao plano da imagem formando o sistema dextrógiro com os eixos (x',y'). A transformação das coordenadas de um ponto do sistema de coordenadas de imagem em milímetros (x,y) para o sistema fotogramétrico (x',y') com distorções é dada pela Equação (02):

$$\begin{aligned}x' &= x - x_0 \\y' &= y - y_0 \\z' &= -f\end{aligned}\tag{02}$$

Onde f é a distância focal, x_0 e y_0 são as coordenadas do ponto principal de (PP).

- Sistema Local do espaço objeto: é um sistema cartesiano tridimensional, com origem local. O eixo X possui orientação na direção leste, o eixo Y possui orientação na direção norte e o eixo Z é vertical ao plano de referência (X,Y).

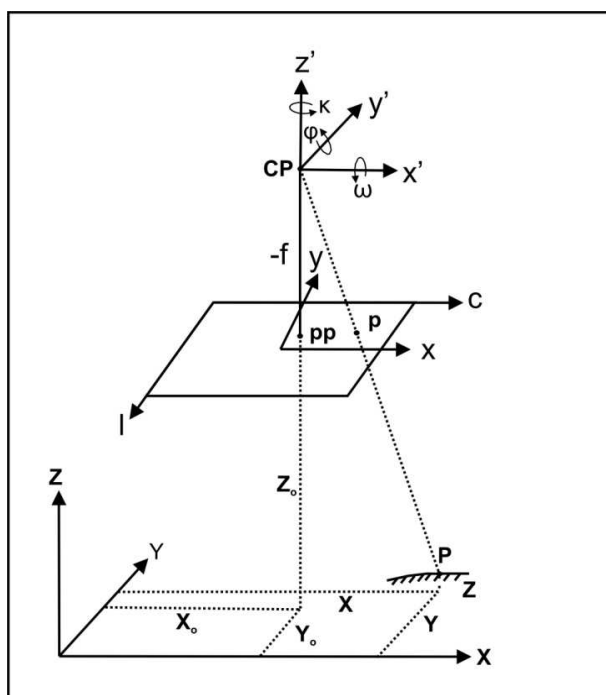


FIGURA 01 - GEOMETRIA DA PERSPECTIVA CENTRAL
FONTE: O autor (2011)

A geometria perspectiva pode ser estabelecida pela condição de colinearidade, que rege que o ponto no espaço imagem (p), o CP e o respectivo ponto no espaço objeto (P) são colineares. As equações de colinearidade, apresentadas na Equação 03, definem a relação entre os referenciais do espaço objeto e o espaço imagem.

$$\begin{aligned} x' &= -f \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x \\ y' &= -f \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y \end{aligned} \quad (03)$$

Onde:

- X, Y e Z são as coordenadas do ponto (P) no espaço objeto.
- X_0 , Y_0 e Z_0 são as coordenadas do CP no espaço objeto.
- Δx e Δy são os desvios da condição de colinearidade.
- m_{ij} são elementos da matriz de rotação M com $1 \leq i \leq 3$ e $1 \leq j \leq 3$. Estes elementos dependem dos ângulos de Euler (ω, ϕ, κ), que descrevem as rotações em torno dos eixos (x', y', z').

A matriz M pode ser obtida pelo produto $M = R_\kappa R_\phi R_\omega$ resultando na Equação 04:

$$M = \begin{bmatrix} \cos \phi \cdot \cos \kappa & \cos \omega \cdot \sin \kappa + \sin \omega \cdot \sin \phi \cdot \cos \kappa & \sin \omega \cdot \sin \kappa - \cos \omega \cdot \sin \phi \cdot \cos \kappa \\ -\cos \phi \cdot \sin \kappa & \cos \omega \cdot \cos \kappa - \sin \omega \cdot \sin \phi \cdot \sin \kappa & \sin \omega \cdot \cos \kappa + \cos \omega \cdot \sin \phi \cdot \sin \kappa \\ \sin \phi & -\sin \omega \cdot \cos \phi & \cos \omega \cdot \cos \phi \end{bmatrix} \quad (04)$$

Os desvios da condição de colinearidade são ocasionados principalmente pela distorção das lentes e pela refração fotogramétrica. Também podem ser considerados os parâmetros de afinidade do sensor (não ortogonalidade e diferença de escala entre os eixos) e, no caso de câmaras analógicas, o trabalho do filme.

A distorção das lentes pode ser dividida em distorção radial simétrica e distorção descentrada. A distorção radial simétrica é causada pela impossibilidade dos fabricantes produzirem lentes com curvatura perfeita. Esta distorção pode ser considerada como sendo a parcela não desejável da refração sofrida por um raio de luz ao atravessar uma lente (ANDRADE, 2003).

O efeito da distorção radial simétrica é um deslocamento radial dos pontos na imagem a partir do ponto principal de simetria. A modelagem deste efeito foi proposta por A. E. Conrady em 1919, podendo ser realizada através de um polinômio (GALO; TOMMASELLI, 2011).

Como apresentado na Figura 02, esta distorção pode ser positiva ou negativa. Segundo Mikhail, Bethel e McGlone (2001) a distorção radial simétrica é denominada positiva, ou também chamada de distorção na forma de almofada (*pincushion distortion*), quando o deslocamento dos pontos ocorre no sentido contrário ao PP, ou seja, os pontos se afastam do PP à medida que o raio aumenta. Esta distorção pode ser considerada negativa, ou distorção na forma de barril (*barrel distortion*), quando o deslocamento dos pontos ocorre no sentido do PP.

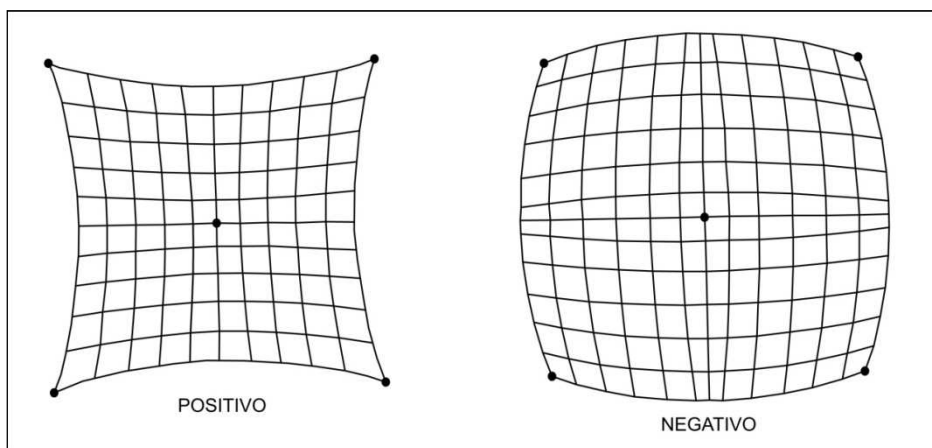


FIGURA 02 - EFEITO DA DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA
 FONTE: Adaptado de MIKHAIL, BETHEL e McGLONE (2001)

Os sistemas ópticos das câmaras possuem um conjunto de lentes que formam a denominada objetiva da câmara. O não alinhamento dos eixos ópticos das lentes que compõem a objetiva causa a distorção descentrada, que resulta em deslocamentos dos pontos na imagem (ANDRADE, 2003). Esta distorção é composta pela distorção tangencial e radial assimétrica. A modelagem deste efeito foi proposta na década de 1960 em trabalhos publicados por Brown, que adaptou o trabalho realizado por Conrady em 1919 para aplicações fotogramétricas (ANDRADE, 2003). A Figura 03 apresenta o comportamento da distorção descentrada, que diferentemente da distorção radial, não possui simetria definida.

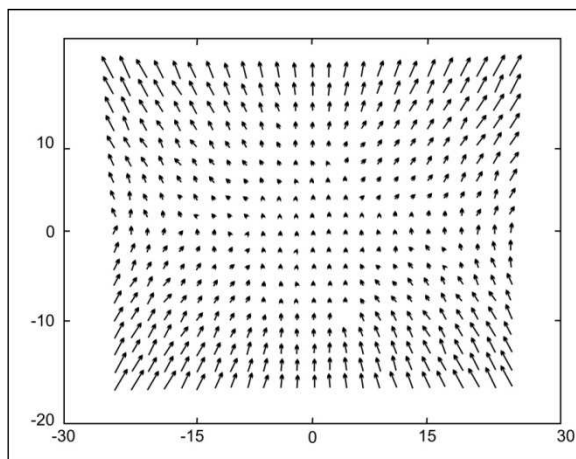


FIGURA 03 - EFEITO DA DISTORÇÃO DESCENTRADA
 FONTE: Adaptado de GALO e TOMMASELLI (2011)

Os desvios da condição de colinearidade causados pela distorção das lentes (radial simétrica e descentrada), podem ser determinados, em suas componentes x e y, como apresentado na Equação 05:

$$\begin{aligned}\Delta x &= (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) \cdot x' + [P_1 (r^2 + 2x'^2) + 2P_2 x' y'] \\ \Delta y &= (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) \cdot y' + [2P_1 x' y' + P_2 (r^2 + 2y'^2)]\end{aligned}\quad (05)$$

Onde x' , y' são as coordenadas fotogramétricas do ponto; K_1 , K_2 e K_3 são os coeficientes da distorção radial simétrica; P_1 e P_2 são os coeficientes da distorção descentrada e r a distância radial de um ponto até o PP (x_0 , y_0). As coordenadas de um ponto no sistema fotogramétrico corrigido das distorções das lentes (x'' , y'') são dadas pela Equação 06:

$$\begin{aligned}x'' &= x' - \Delta x \\ y'' &= y' - \Delta y\end{aligned}\quad (06)$$

Os desvios da condição de colinearidade também podem ser ocasionados por fatores externos à geometria interna da câmara. Os raios de luz que formam a imagem, ao atravessarem a atmosfera são desviados de sua trajetória devido à variação dos índices de refração; este efeito causa um deslocamento radial do ponto na imagem sendo denominado de refração fotogramétrica. Segundo Mitishita e Olivas (2001) a refração fotogramétrica é um erro sistemático que não pode ser parametrizado nas equações de colinearidade, junto com a distorção radial simétrica, pois são fisicamente o mesmo fenômeno e portanto correlacionados.

A modelagem da refração fotogramétrica é bastante complexa devido à dificuldade da obtenção de parâmetros que descrevam as condições meteorológicas em solo e do ambiente da câmara no exato instante de tomada das imagens. Considerando este fato, foram desenvolvidos diferentes modelos de atmosfera padrão (WOLF; DEWITT, 2000; MIKHAIL; BETHEL; MCGLONE, 2001). Em Mikhail, Bethel e McGlone (2001) é apresentado o seguinte modelo de atmosfera padrão:

$$K = \frac{2410H}{H^2 - 6H + 250} - \frac{2410h}{h^2 - 6h + 250} \left(\frac{h}{H} \right) \quad (07)$$

$$\begin{aligned} \Delta x_a &= x' \left(1 + \frac{r^2}{f^2} \right) K \\ \Delta y_a &= y' \left(1 + \frac{r^2}{f^2} \right) K \end{aligned} \quad (08)$$

Onde H representa a altura de voo em metros, h a elevação do terreno em metros e Δx_a , Δy_a representam as componentes da refração fotogramétrica em x e y.

Em câmaras digitais podem ser considerados os parâmetros de afinidade (A e B) que permitem modelar a não ortogonalidade entre os eixos de referência e diferenciais de escala entre os eixos (HABIB; MORGAN, 2003). A Equação (09) apresenta as componentes da afinidade Δx_{AD} , Δy_{AD} nas coordenadas x e y.

$$\begin{aligned} \Delta x_{AD} &= -A_x + B_y \\ \Delta y_{AD} &= A_y \end{aligned} \quad (09)$$

Shortis e Beyer (1997) demonstraram que estes parâmetros podem ser considerados insignificantes em câmaras da série *Digital Camera Systems* (DCS). Como a câmara utilizada nesta pesquisa pertence à esta série, os parâmetros de afinidade não foram considerados nos processamentos de calibração realizados.

2.2.2 Métodos de Calibração

No caso da calibração geométrica de câmaras, diferentes métodos podem ser considerados: Métodos de Laboratório e Métodos de Campo (GALO; TOMMASELLI, 2011). A calibração em laboratório é geralmente realizada pelos

fabricantes das câmaras, e não reflete as condições de voo como os efeitos de temperatura e pressão de ar (YASTIKLI; TOTH; BRZEZINSKA, 2007; HONKAVAARA, 2008).

Os métodos de calibração de campo não necessitam de equipamentos específicos e de alto custo como os métodos de laboratório (RUY, 2008), além de oferecerem soluções mais completas com superabundância de observações (ANDRADE, 2003).

Em todos os métodos de campo uma série de fotografias são tomadas de um campo de prova; os alvos utilizados na calibração podem ser feições naturais, alvos pré-sinalizados ou até mesmo estrelas. Como métodos de calibração de campo podem ser citados: o método estelar, o método dos campos mistos e o método das câmaras convergentes (ANDRADE, 2003; MERCHANT, 1979).

Os dois últimos métodos citados possibilitam que as imagens utilizadas na calibração sejam tomadas em condições similares às condições de uso da câmara durante o recobrimento fotogramétrico. Estes métodos foram desenvolvidos para resolver o problema da dependência linear entre pares de parâmetros no ajustamento da aerotriangulação por feixes de raios utilizando a equação de colinearidade com parâmetros adicionais.

Merchant (1979), demonstra a existência de elevada dependência linear entre algumas colunas da matriz das derivadas parciais no caso da solução da calibração pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) utilizando fotografias aéreas verticais tomadas em uma região com terreno plano. A análise da dependência linear pode ser realizada por meio da razão entre as derivadas dos pares de parâmetros de orientação interior e exterior apresentadas no Quadro 01.

Pares de Parâmetros	Razão
x_0 e X_0	$-f/(Z-Z_0)$
y_0 e Y_0	$-f/(Z-Z_0)$
f e Z_0	$-f/(Z-Z_0)$

QUADRO 01 - DEPENDÊNCIA LINEAR ENTRE PARES DE COEFICIENTES
FONTE: MERCHANT (1979)

Como a razão entre os pares de parâmetros é constante, existe dependência linear entre os mesmos, o que torna impossível a determinação simultânea dos três pares de parâmetros no ajustamento. A dependência entre os

pares de parâmetros ocorre quando $(Z-Z_0)$ é constante, ou seja, quando a altura de voo é constante e o terreno é plano. Neste caso, a altura de voo (Z_0) e a distância focal (f) não podem ser separados, pois a mesma escala de imagem (ei) pode ser obtida de diferentes combinações de Z_0 e f (Equação 10):

$$ei = \frac{Z_0 1}{f_1} = \frac{Z_0 2}{f_2} \quad (10)$$

A Figura 04 ilustra a impossibilidade de separação dos dois componentes:

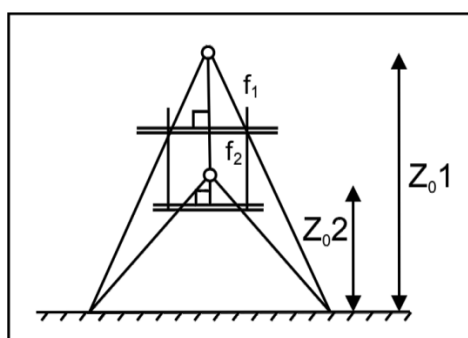


FIGURA 04 - PARA DIFERENTES ALTURAS DE VOO E DISTÂNCIAS FOCAIS A MESMA ESCALA DE VOO PODE SER OBTIDA
FONTE: Adaptado de NOVAK (1991)

Merchant (1980) apresenta duas alternativas para reduzir as correlações existentes na calibração utilizando fotografias aéreas. A primeira alternativa apresentada é a fixação da posição das estações de exposição no ajustamento da calibração. Atualmente, com a utilização de receptores de sinais GNSS a bordo da aeronave, a determinação da posição das estações de exposição é facilmente resolvida. Esta abordagem é empregada nos experimentos de calibração realizados nesta pesquisa. A segunda alternativa apresentada por Merchant (1980) é o emprego de um campo de prova tridimensional, como será descrito posteriormente no Método dos Campos Mistos.

Outros procedimentos que podem ser utilizados para atenuar as correlações entre POI e POE seriam a tomadas de fotografias convergentes e o uso de faixas de voo cruzadas (WOLF; DEWITT, 2000; ANDRADE, 2003; MERCHANT, 1980). Na presente pesquisa, foram realizados experimentos de calibração aérea utilizando faixas de voo cruzadas e experimentos de calibração terrestre pelo Método das Câmaras Convergentes, a ser discutido posteriormente.

Segundo Clarke e Fryer (1998) a primeira câmara foi calibrada no Canadá no ano de 1920, e a partir daí, diversos métodos de calibração foram desenvolvidos.

2.2.2.1 Método Estelar

Um dos primeiros métodos desenvolvidos para a calibração de campo foi o Método Estelar, que consiste na obtenção de um conjunto de imagens estelares a partir de um ponto com coordenadas astronômicas conhecidas. Por meio das medidas realizadas sobre as imagens, da determinação da ascensão reta e declinação das estrelas imageadas e da correção da refração fotogramétrica é possível estimar os POI da câmara pelo MMQ.

Apesar de prover alta qualidade nos POI determinados, este método não se mostrou adequado na calibração de câmaras para finalidades relacionadas ao mapeamento fotogramétrico. Neste método, a câmara é calibrada em condições diversas às condições em que esta é submetida durante o recobrimento aéreo. No recobrimento aéreo a obtenção das imagens é realizada durante o dia, com boas condições de luminosidade; o eixo óptico da câmara é orientado para o nadir e a câmara sofre constante vibração devido à instabilidade da aeronave. Além disso, este método possui limitações como a necessidade da identificação de cada estrela imageada (CLARKE; FRYER, 1998) e necessidade de boas condições atmosféricas para a coleta das imagens (GALO; TOMMASELLI, 2011). Diante dos fatores apresentados, outros métodos de calibração de campo foram desenvolvidos para aplicações fotogramétricas.

2.2.2.2 Método dos Campos Mistos

No Método dos Campos Mistos o processo de calibração da câmara é realizado com imagens aéreas adquiridas de dois campos de prova: um campo de prova com terreno plano contendo grande quantidade de pontos de apoio e outro com terreno acidentado com menor número de pontos de apoio. Para resolver o problema de correlação entre os pares de parâmetros de orientação interior e exterior, os alvos do campo de prova devem possuir desníveis entre si.

Experimentos realizados por Leigh² (1973) *apud* Andrade e Olivas (1981) demonstraram que o ideal para reduzir as correlações entre POI e POE é que a diferença altimétrica entre os alvos seja de, aproximadamente, 20% da altura de voo.

Como apresentado na Figura 05, a variação de escala nas fotografias, isto é, a diferença da altura de voo acima do terreno nos diferentes pontos da fotografia (no topo da montanha e no fundo do vale), permite que as correlações entre Z_0 e f sejam atenuadas (NOVAK, 1991). Como a escala da imagem e a altura de voo (Z_0) são alteradas, enquanto f se mantém constante, os POI e POE podem ser separados (Equação 11).

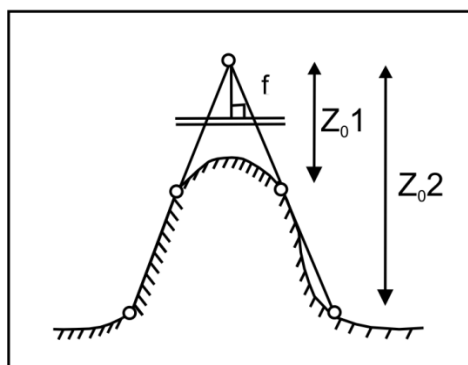


FIGURA 05 - CAMPOS MISTOS PERMITEM SEPARAR A DISTÂNCIA FOCAL DA ALTURA DE VOO
FONTE: Adaptado de NOVAK (1991)

$$ei_1 = \frac{Z_{01}}{f} \qquad ei_2 = \frac{Z_{02}}{f} \qquad (11)$$

O método apresentado por Merchant (1980) baseia-se na utilização de dois campos de prova, um com terreno acidentado e outro com terreno plano (Figura 06).

² LEIGH, G.E. A **study in improvement of one aspect of the metric camera system**. The Ohio State University, 1973.

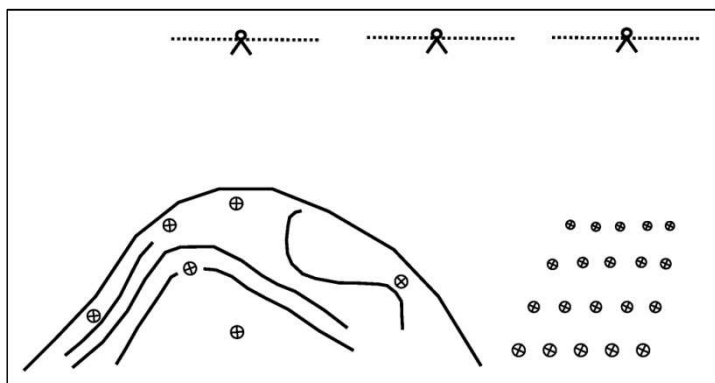


FIGURA 06 - CAMPO DE PROVA EMPREGADO NO MÉTODO DOS CAMPOS MISTOS
 FONTE: Adaptado de MERCHANT (1980)

O modelo matemático utilizado na calibração pelo Método dos Campos Mistos é a equação de colinearidade com parâmetros adicionais, sendo o ajustamento do bloco fotogramétrico realizado simultaneamente com a determinação dos POI.

2.2.2.3 Método das Câmaras Convergentes

O Método de Calibração das Câmaras Convergentes foi proposto por Duane Brown em 1971 para a calibração de uma câmara Hasselblad 500 utilizada na Missão Apollo 14 (BROWN, 1971). A dependência linear entre os POI e POE é atenuada com o uso de fotografias convergentes.

Para o emprego deste método, as fotografias utilizadas devem ser obtidas com alta convergência (aproximadamente 90°), sendo que ao menos uma destas fotografias deve ter uma rotação do ângulo kappa (eixo z da câmara). Esta rotação em torno do ângulo kappa, serve para separar os coeficientes da distorção radial simétrica dos coeficientes da distorção descentrada (ANDRADE, 2003). O método utiliza o mesmo modelo matemático citado no Método dos Campos Mistos.

O Método de Calibração das Câmaras Convergentes é mais empregado com fotografias tomadas em campos de prova terrestre. Aproximações desse método em aplicações aéreas podem ser realizadas com o uso de fotos inclinadas, como visto em Côrtes (2010). A Figura 07 mostra o esquema de tomada de fotografias de um campo de prova terrestre para a aplicação do Método das Câmaras Convergentes.

Os alvos do campo de prova apresentado na Figura 07, possuem um sistema de coordenadas cartesiano tridimensional local, com origem no canto inferior esquerdo do campo. O eixo X deste sistema está orientado para direita no sentido horizontal, o eixo Y orientado para cima no sentido vertical e o eixo Z saindo do campo de prova. O método está baseado na obtenção de imagens a partir de três estações de exposição, sendo que em cada uma das estações de exposição são tomadas quatro fotografias com diferentes variações no ângulo kappa da câmara.

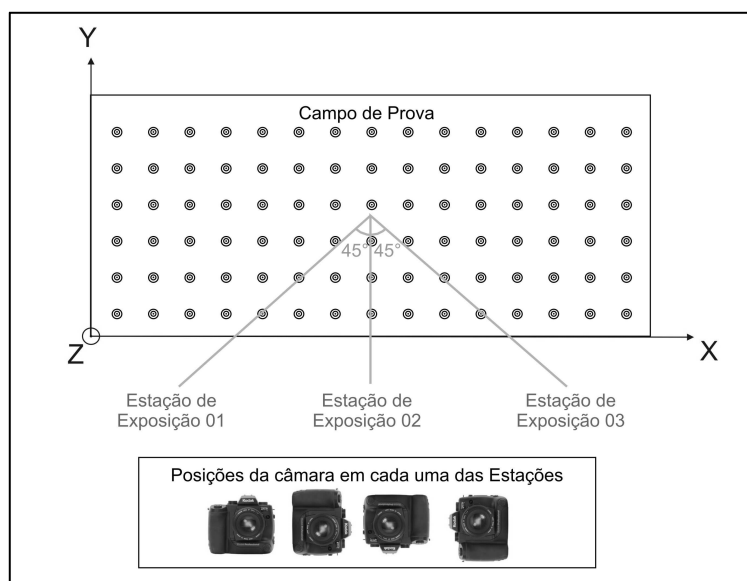


FIGURA 07: MÉTODO DAS CÂMARAS CONVERGENTES
FONTE: O autor (2011)

Segundo Galo e Tommaselli (2011), o uso do Método das Câmaras Convergentes possibilita a calibração utilizando as próprias informações geométricas da câmara, sem necessidade de controle externo, exceto um fator de escala. Os autores afirmam que a partir da fixação da posição e orientação de uma das estações de exposição e de um fator de escala, é possível estimar a posição e orientação das demais em relação ao feixe fixo. Esta solução é denominada de auto-calibração ou *self-calibration* e é considerado um método robusto para a determinação dos POI a partir de câmaras com diferentes pontos de vista (REMONDINO; FRASER, 2006).

Para o emprego da auto-calibração é necessário que as imagens que compõem o bloco fotogramétrico sejam rotacionadas e convergentes entre si. Além disso, é recomendado que estas imagens sejam adquiridas de objetos

tridimensionais. Caso a configuração das imagens que compõe o bloco fotogramétrico não obedeça estes critérios, podem ocorrer correlações e instabilidades na solução do ajustamento por feixes de raios (REMONDINO; FRASER, 2006).

O termo auto-calibração é empregado por muitos autores como sinônimo de calibração em serviço, contudo na auto-calibração não é necessária a utilização de pontos de controle (CLARKE; FRYER, 1998). Na calibração em serviço ou calibração *on-the-job* deve ser utilizado um campo de prova com pontos de controle bem distribuídos e de alta acurácia (YASTIKLI; TOTH; BRZEZINSKA, 2007; HONKAVAARA *et al.*, 2008).

A calibração em serviço é muito empregada a partir de observações terrestres, embora possa também ser utilizada em aplicações aéreas. Porém, a existência de um campo de prova perto da área do projeto de um aerolevantamento fotogramétrico nem sempre é possível. Uma das metodologias de calibração apresentadas nesta pesquisa utiliza somente dados do próprio recobrimento aéreo para a realização da calibração. Nesta pesquisa o termo empregado foi calibração em serviço, visto que, foram utilizados pontos de controle nos processamentos de calibração.

2.2.3 Estado da arte da Calibração de Câmaras

A utilização de câmaras digitais em aplicações fotogramétricas permite que diversos processos fotogramétricos sejam automatizados, sendo esta uma busca constante em pesquisas relacionadas com a Fotogrametria. A maioria dos pesquisadores procura em áreas, como a visão computacional, artifícios para diminuir cada vez mais a interação humana nos processos fotogramétricos. Neste contexto, serão relatados trabalhos atuais que buscam o desenvolvimento de metodologias e a automação de processos na área de calibração geométrica de câmaras.

Lerma e Cabrelles (2007) determinaram os parâmetros de distorção radial e descentrada de uma câmara digital não métrica usando o método de calibração *Plumb-Line*. Foram realizados experimentos com diferentes números, orientações e distribuição de padrões retilíneos na imagem. Segundo os autores, a desvantagem

desse método é a impossibilidade de determinar a distância focal calibrada, embora ele possibilite a determinação com precisão dos demais POI. Os autores citam ainda, que o método é de fácil e rápida aplicação, mesmo para pessoas não especializadas em Fotogrametria.

Habib, Morgan e Lee (2002) incorporaram feições retas no ajustamento por feixes perspectivos com auto-calibração de imagens de quadro. As feições retas presentes no espaço objeto foram representadas por dois pontos, medidos nas imagens de forma monoscópica. Desvios das retas no espaço imagem foram usados para derivar valores das distorções das lentes. Segundo os autores, a utilização de feições retas como apoio nos processos de calibração de câmaras é importante, pois as deformações e distorções podem ser modeladas como funções contínuas.

Em Habib e Morgan (2003), a auto-calibração utilizando pontos como apoio foi comparada com o processamento incorporando linhas retas no modelo matemático. As linhas retas foram extraídas automaticamente das imagens utilizando o detector de bordas de *Canny*. Nesta pesquisa, foi demonstrado que a reconstrução do espaço objeto utilizando os POI determinados nos dois processos de calibração, com pontos e com linhas retas como apoio, são semelhantes. Contudo, os autores alegam que a construção de um campo de prova com feições retas é mais fácil de ser estabelecido.

Em Remondino e Fraser (2006), diferentes métodos de calibração foram comparados utilizando campos de prova terrestre bidimensionais e tridimensionais. Os autores apresentam recomendações relacionadas com a configuração geométrica das fotografias utilizadas na calibração. Segundo os autores, os ângulos de convergência entre as fotografias tomadas do campo de prova tem influência direta na precisão dos POI determinados. Aumentando o ângulo de convergência entre as fotografias a relação base-profundidade cresce e, conseqüentemente, a precisão dos parâmetros de calibração determinados também aumenta. É recomendada a utilização de fotografias rotacionadas em torno do eixo z da câmara para quebrar as correlações entre POI e POE, contudo estas correlações podem ser atenuadas com o uso de um campo de prova tridimensional. Quanto maior o número de raios para um mesmo ponto, maior a confiabilidade da calibração, embora segundo estes autores sejam suficientes 8 raios por ponto. Além da necessidade de um grande número de pontos medidos por fotografia, é importante a distribuição dos

pontos por todo o quadro da imagem. Segundo os autores, um campo de prova bidimensional pode ser utilizado, mas é necessário que a configuração geométrica das fotografias utilizadas siga alguns critérios como: fotografias rotacionadas em torno do eixo z da câmara, com alto grau de convergência e tomadas a diferentes distâncias do campo de prova, de forma a gerar imagens com diferentes escalas. Os autores afirmam que a auto-calibração só é confiável se o bloco fotogramétrico utilizado possuir a configuração de imagens recomendada e ainda conter uma grande quantidade de pontos bem distribuídos.

Cronk, Fraser e Hanley (2006) descrevem um método de calibrar automaticamente câmaras digitais coloridas utilizando a auto-calibração. Os atributos de cor RGB (*red*, *green* e *blue*) são explorados para detectar e identificar automaticamente alvos pré-sinalizados. O impacto da aberração cromática é discutido, pois diferentes valores de distância focal e coeficientes de distorção radial são encontrados para cada banda R, G e B. São utilizados valores iniciais de orientação relativa calculados pela equação de coplanaridade não-linear. A determinação dos POI pela metodologia proposta foi realizada em três processamentos sequenciais de auto-calibração. O primeiro processamento utilizou como parâmetro adicional somente a distância focal. A partir do valor da distância focal refinado na primeira etapa, as coordenadas do PP puderam ser determinadas em um segundo processamento de auto-calibração. E finalmente, no último processamento foram inseridos como parâmetros adicionais os parâmetros de distorção das lentes.

Honkavaara (2008) apresentou uma metodologia de calibração geométrica e radiométrica de câmaras fotogramétricas digitais. Um campo de prova foi implantado para a realização das calibrações geométrica e radiométrica de forma simultânea e três câmaras fotogramétricas de grande formato foram calibradas: Leica Geosystem ADS40, Intergraph DMC e Microsoft UltraCamD. Os experimentos realizados mostraram que a calibração destes sensores deve incluir os seguintes processos: calibração em laboratório, calibração com campo de prova, calibração em serviço e validação do produto final.

Ruy (2008) implementou um sistema de aquisição de imagens digitais formado por duas câmaras de médio formato integradas à sensores de orientação direta. Foram realizados experimentos de fototriangulação com parâmetros

adicionais baseados no georreferenciamento direto. A partir dos resultados dos experimentos realizados, foi verificada uma redução significativa da necessidade de informações de campo e um aumento de cerca de 40% na acurácia da reconstrução dos pontos quando comparado a um processo de aerotriangulação convencional.

Considerando que as câmaras digitais de baixo custo não são construídas especificamente para a reconstrução fotogramétrica, estas podem não possuir a estabilidade geométrica apresentada pelas câmaras métricas. Para a verificação da estabilidade de câmaras de baixo custo é necessária uma análise mais profunda, de forma a avaliar se as características internas desta câmara permanecem estáveis durante o tempo (HABIB *et al.*, 2008).

Habib, Pullivelli e Morgan (2004) avaliaram a estabilidade geométrica de cinco câmaras de baixo custo utilizando um campo de prova com feições retas e pontuais. Foram empregados dois métodos para a avaliação da estabilidade das câmaras, ou seja, para a comparação dos POI provenientes das calibrações realizadas em diferentes épocas. No primeiro método, a similaridade entre os feixes de raios reconstruídos, utilizando os diferentes conjuntos de POI, foi comparada assumindo que estes feixes possuem a mesma origem (o mesmo CP), ou seja, as coordenadas do CP foram injuncionadas. No segundo método empregado, foram permitidos deslocamentos e rotações entre os dois feixes e as coordenadas obtidas no espaço objeto foram comparadas. Nos dois métodos a similaridade entre os POI foi medida pelo deslocamento entre os dois feixes de raios reconstruídos utilizando os dois conjuntos de POI.

Habib *et al.* (2008) discute padrões e especificações para a avaliação da estabilidade geométrica de uma câmara. A análise de estabilidade é baseada na avaliação do grau de similaridade entre os feixes perspectivais reconstruídos em sessões de calibração temporais. A hipótese apresentada neste trabalho é de que se a reconstrução do espaço objeto empregando dois conjuntos de POI são equivalentes, então os POI utilizados são similares.

Em Mitishita *et al.* (2009) foi verificada a estabilidade geométrica de uma câmara de baixo custo sendo esta submetida a variações de temperatura. Nos experimentos de calibração foram utilizados dois campos de prova, um bidimensional e outro tridimensional. Duas calibrações foram realizadas submetendo a câmara a temperaturas próximas a 0°C e quatro calibrações com a temperatura

próxima a 25°C. Os valores de POI das seis calibrações não foram similares e a câmara foi considerada geometricamente instável. No entanto, os resultados não provaram que a instabilidade geométrica da câmara é decorrente da variação da temperatura.

Em Mitishita *et al.* (2010) uma câmara digital de baixo custo foi calibrada utilizando duas metodologias diferentes: calibração independente e calibração em serviço. Na calibração em serviço as posições de tomada das imagens foram fixadas no ajustamento, de forma a minimizar as correlações entre os POI e POE. Os parâmetros de distorção das lentes determinados pelas diferentes metodologias foram considerados similares.

2.3 SISTEMA LIDAR

O sistema LIDAR é um sensor ativo que possibilita a determinação de coordenadas tridimensionais de pontos sobre a superfície física. Os pulsos de laser são gerados e emitidos pelo sistema com o auxílio de um espelho de varredura, de forma que a medida de distância entre o sensor e o objeto iluminado é determinada a partir do intervalo de tempo entre a emissão e o retorno do pulso laser (DALMOLIN; SANTOS, 2004). Os sistemas LIDAR operam na faixa do infravermelho próximo do espectro eletromagnético, região que compreende os comprimentos de onda de 1040 nm à 1060 nm (JENSEN, 2009).

Em aplicações aéreas, a determinação das coordenadas tridimensionais dos pontos medidos na superfície topográfica está baseada no conhecimento da posição e orientação do sensor no momento da medição de cada ponto. Estas informações são providas pelos dois componentes que juntamente com o *laser scanner* integram o sistema LIDAR, sendo estes o receptor de sinais GNSS e o INS (WEHR; LOHR, 1999; MIKHAIL; BETHEL; MCGLONE, 2001).

Para o posicionamento preciso do sistema LIDAR durante a aquisição dos dados, normalmente são empregados dois receptores GNSS, um a bordo da aeronave e outro posicionado no solo. Estes receptores registram simultaneamente as informações de posicionamento. As coordenadas da estação terrestre, denominada de base, devem ser determinadas através de um levantamento preciso,

de forma a serem utilizadas no pós-processamento das informações provenientes dos dois receptores de sinais GNSS.

Após a realização do voo, o sistema LIDAR fornece basicamente dois conjuntos de dados: dados de posição e orientação provenientes das medidas do receptor de sinais GNSS e do INS, bem como os intervalos de tempo (medidas de distância do laser).

Considerando que a precisão dos dados providos pelo receptor GNSS e pelo INS é superior a 0,10 m em posição e 0,02° em orientação, as coordenadas dos pontos podem ser transformadas para um sistema de coordenadas local (WEHR; LOHR, 1999). Entretanto, alguns parâmetros de transformação devem ser considerados, como os ângulos *roll*: ϕ , *pitch*: θ e *yaw*: ψ com origem no INS, posição do *laser scanner* em relação ao INS e posição do INS em relação ao receptor de sinais GNSS. Estes parâmetros são denominados de parâmetros de calibração do sistema LIDAR, sendo determinados em recobrimentos aéreos específicos para a calibração. Normalmente, a calibração do sistema LIDAR é realizada utilizando como referência áreas planas, como campos de esporte, estádios ou grandes edificações. Segundo Wehr e Lohr (1999) não existe uma metodologia padrão para a calibração do sistema LIDAR; cada empresa adota um procedimento próprio para a calibração.

Conforme o fluxograma de processamento dos dados LIDAR, apresentado na Figura 08, os pontos laser podem ser determinados no sistema de referência *World Geodetic System 84* (WGS 84) ou outro sistema de referência a partir de três conjuntos de dados:

- parâmetros de calibração do sistema LIDAR;
- medidas de distância com seus respectivos ângulos de varredura;
- dados provenientes do receptor de sinais GNSS e do INS;

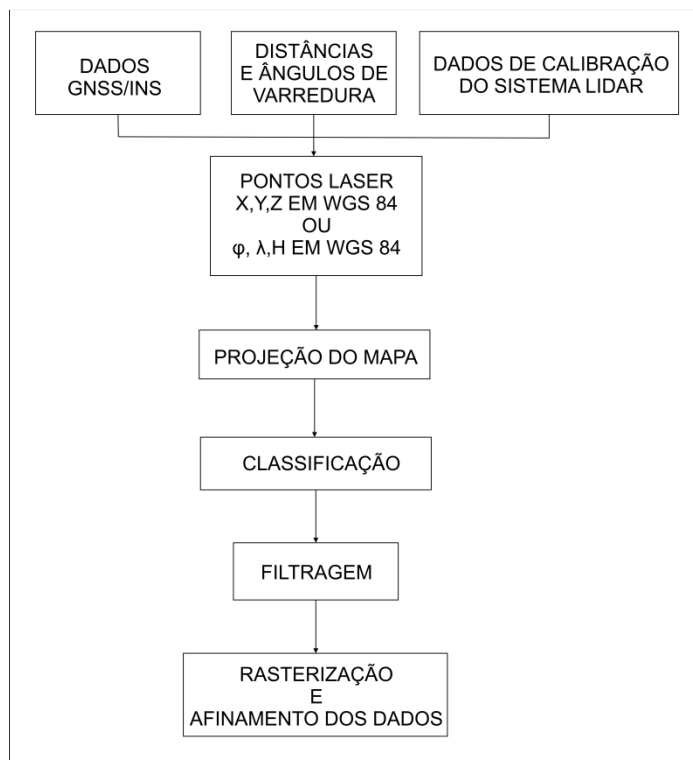


FIGURA 08 - FLUXOGRAMA DE PROCESSAMENTOS DOS DADOS LIDAR
 FONTE: Adaptado de WEHR e LOHR (1999)

A primeira etapa do processamento de dados do sistema LIDAR consiste em transformar os pontos medidos para o sistema de referência WGS 84. Deste processo, resulta uma nuvem de pontos aleatoriamente distribuídos em posição e elevação. Segundo Wehr e Lohr (1999) a distribuição dos pontos medidos depende do tipo de espelho de varredura utilizado no sistema (espelho oscilador, varredura Palmer ou polígono de rotação).

As medidas de elevação dos pontos são classificadas em relação a sua posição, sendo os pontos separados como pontos do terreno e pontos de vegetação e edificações através da filtragem dos dados. Diferentes algoritmos foram desenvolvidos para a filtragem dos dados LIDAR (VOSSELMAN, 2000; NARDINOCCHI; FORLANI; ZINGARETTI, 2003; SITHOLE; VOSSELMAN, 2003; FORLANI; NARDINOCCHI, 2007).

Dentre os produtos gerados por um levantamento LIDAR podem ser considerados o MDS, que trata dos pontos que representam toda a região observada, incluindo o terreno, edificações e vegetação. No caso de ter sido realizada a filtragem dos dados pode ser gerado o Modelo Digital do Terreno (MDT), que trata dos pontos que representam somente o terreno, e ainda o Modelo Digital

de Superfície Normalizada (MDSn), que pode ser tratado como a diferença entre o MDS e o MDT, ou seja, este representa somente as elevações contidas na superfície do terreno, como vegetação e edificações.

Segundo Dalmolin e Santos (2004), o processamento de dados distribuídos irregularmente, tais como os obtidos pelo LIDAR, requer mais tempo que o processamento de dados distribuídos regularmente. O processo de reamostragem dos dados em uma malha regular é realizado por meio da interpolação dos pontos. Os métodos mais usuais de interpolação são o vizinho mais próximo, a interpolação bilinear e a estrutura de grade triangular (*Triangulated Irregular Network* - TIN). A filtragem dos dados também pode ser realizada na grade regular interpolada, entretanto, neste caso, o processo de filtragem pode ser influenciado pelos erros de interpolação.

O processo de afinamento dos dados é necessário pois a quantidade de dados gerados por um aerolevantamento com o sistema LIDAR é muito grande, tornando o processamento destes dados lento.

Cada pulso laser emitido pelo sistema pode resultar em múltiplos retornos. O pós-processamento dos dados originais irá resultar em diversos arquivos LIDAR, que se referem ao primeiro retorno, à possíveis retornos intermediários, ao último retorno e ainda à intensidade de retorno do pulso laser.

A informação da intensidade de retorno do pulso laser possibilita a geração da imagem de intensidade. Esta imagem possui uma riqueza de detalhes e é, em muitos aspectos, semelhante a uma imagem da área de estudo na faixa espectral do infravermelho próximo. Entretanto, a intensidade de retorno do pulso laser é influenciada pelos materiais que constituem a superfície topográfica e pelo espalhamento, distância e o ângulo de incidência do pulso (JENSEN, 2009). Em muitos casos, a intensidade registrada não é a integração dos ecos que retornaram de todos os pulsos, mas apenas seus máximos (BALTSAVIAS, 1999).

2.4 INTEGRAÇÃO SISTEMA LIDAR E CÂMARA DIGITAL

Atualmente, a reconstrução tridimensional de superfícies pode ser realizada por meio do processamento de imagens fotográficas ou pode ser derivada das informações tridimensionais provenientes de um levantamento realizado por um

sistema LIDAR. A utilização de uma destas duas tecnologias, de forma independente, apresenta vantagens e desvantagens, as quais foram relatadas em diversos trabalhos, e resumidas no Quadro 02.

É possível observar que algumas das desvantagens que uma tecnologia proporciona, pode ser compensada pelas vantagens que a outra oferece, demonstrando a natureza complementar das informações provenientes dos diferentes sistemas. A fusão dos dados provenientes de um recobrimento fotogramétrico e de um levantamento LIDAR propicia maior quantidade de informações do que a utilização somente de um dos sensores (SCHENK; CSATHO, 2002).

Como já foi mencionado, o sistema LIDAR é composto pelos sensores: *Laser scanner*, receptor de sinais GNSS e INS. O posicionamento de receptores GNSS é realizado por meio de sinais de rádio recebidos pelos satélites, entretanto estas medidas de posicionamento podem ser afetadas por perturbações e interrupções nestes sinais. Os sensores INS medem acelerações e variações angulares utilizando acelerômetros e giroscópios, provendo desta forma a navegação sem interferências externas. Porém, a qualidade destas medidas é degradada ao longo da trajetória devido à erros internos do INS.

LIDAR	Fotogrametria
- Sistema Ativo;	- Sistema Passivo;
- Sistema pontual;	- Sistema linear ou quadro;
- aquisição direta de pontos com coordenadas tridimensionais no espaço objeto;	- processamento de coordenadas tridimensionais demorado, e necessidade de mais de 1 imagem para a aquisição de informações tridimensionais;
- baixa redundância de informações;	- alta redundância de informações;
- acurácia vertical melhor do que acurácia planimétrica;	- acurácia planimétrica é melhor do que acurácia vertical;
- dificuldade em derivar informações semânticas;	- rico em informações semânticas (boa interpretabilidade);
- possui densa informação de superfícies homogêneas (mede áreas sem textura);	- baixa densidade de informações em superfícies homogêneas;
- não possui informações de <i>breaklines</i> (falta de precisão em linhas e bordas);	- boa informação posicional de <i>breaklines</i> (descontinuidades);
- independe da iluminação para aquisição de dados (levantamento de dados durante o dia ou noite);	- depende da luz para a aquisição de imagens (levantamento de dados somente durante o dia);
- possui áreas de oclusão e sombra devido à inclinação do sinal emitido;	- possui áreas de oclusão e sombra devido a declividades intensas na superfície imageada;

QUADRO 02 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DA UTILIZAÇÃO INDEPENDENTE DE DADOS FOTOGRAFÉTICOS E DADOS DO SISTEMA LIDAR

FONTE: Adaptado de BALTSAVIAS (1999), AGUILERA, GONZÁLVES e LAHOZ (2007), HABIB *et al.* (2005), KERN (2001), MACHADO (2006), RÖNNHOLM *et al.* (2007), SHENK e CSATHO (2002)

Neste contexto, a integração do receptor de sinais GNSS com o INS se apresenta bastante vantajosa, de maneira que o INS fornece informações de posição e velocidade quando há perda de sinal GNSS, enquanto que a estabilidade provida pelo sistema GNSS compensa os erros internos dos sensores INS acumulados ao longo da trajetória.

A integração da câmara com o sistema LIDAR possibilita a determinação dos POE das imagens a partir de informações providas pelo sistema LIDAR. Existem três formas de determinar os POE de um sensor imageador:

- Georreferenciamento Direto: a determinação dos POE das câmaras é realizada por meio das informações providas por sensores de posicionamento e orientação (receptor de sinais GNSS e INS). O georreferenciamento direto foi introduzido por Schwarz, Fraser e Gustafson (1984), sendo abordado posteriormente em diversos estudos (SKALLOUD; CRAMER; SCHWARZ, 1996; CRAMER; STALLMAN, 2001; MOSTAFA; HUTTON, 2001; SKALLOUD; LEGAT, 2008);

- Georreferenciamento Indireto: a determinação dos POE das imagens é realizada por meio do processamento de Aerotriangulação utilizando um número suficiente e bem distribuído de pontos de apoio;
- Orientação Integrada de Sensores: a determinação dos POE é realizada combinando os benefícios do georreferenciamento direto com os benefícios da aerotriangulação por feixes de raios. Os POE determinados no georreferenciamento direto são utilizados como observações na aerotriangulação, ou seja, os POE advindos do georreferenciamento direto são refinados no processo de aerotriangulação (HONKAVAARA *et al.*, 2002; WEGMANN; HEIPKE; JACOBSEN, 2004; IP, 2005; YASTIKLI; JACOBSEN, 2005).

Os erros sistemáticos causados pelo georreferenciamento direto estão relacionados com os parâmetros (*shift* e *drift*) que modelam os desvios da trajetória do GNSS/INS (MIKHAIL; BETHEL; McGLONE, 2001). Estes parâmetros absorvem deslocamentos lineares e derivas proporcionais ao tempo decorrente na faixa de voo, onde a aeronave se desloca de forma linear sem movimento de correção. Para minimizar o acúmulo destes erros, durante o voo fotogramétrico são realizadas manobras de calibração do sistema GPS/INS como curvas com grande inclinação e manobras na forma de oito.

Quando se utiliza de observações advindas de um sistema LIDAR para determinar os POE de imagens fotogramétricas, deve-se diferenciar a orientação integrada do sensor e a orientação direta do sensor. A orientação direta do sensor, ou georreferenciamento direto, consiste em, primeiramente, determinar os POE, baseando-se nas observações provenientes do sistema LIDAR, e em um processamento de aerotriangulação, determinar as coordenadas dos pontos no espaço objeto. Na orientação integrada do sensor em um mesmo processamento são determinadas as coordenadas dos pontos no espaço objeto e refinados os POE obtidos pelo sistema LIDAR. O Quadro 03 apresenta as características das diferentes soluções do georreferenciamento de imagens.

	Vantagens	Desvantagens
Georreferenciamento Direto	<ul style="list-style-type: none"> - a aerotriangulação é realizada somente para a calibração dos sensores envolvidos - não é necessário o emprego de pontos de apoio (exceto para o controle de qualidade) - é possível o emprego de faixas isoladas, ou somente uma fotografia 	<ul style="list-style-type: none"> - a precisão posicional dos dados obtidos depende da precisão do processamento dos dados do receptor de sinais GNSS - é recomendada alta acurácia nos processamentos dos dados providos pelo receptor GNSS e sistema INS - o custo do sistema de mapeamento é elevado devido a necessidade do receptor GNSS e do sistema INS - requer alta precisão nos parâmetros de calibração do sistema
Georreferenciamento Indireto	<ul style="list-style-type: none"> - solução redundante - solução robusta contra erros nos POI 	<ul style="list-style-type: none"> - é necessário um número mínimo e bem distribuído de pontos de apoio no bloco fotogramétrico - apresenta alto custo operacional
Orientação Integrada de Sensores	<ul style="list-style-type: none"> - combina as vantagens do georreferenciamento direto e indireto - possibilita o uso de sistemas de posicionamento e orientação (receptor GNSS/INS) menos acurados - não são necessários pontos de apoio - permite o refinamento do "<i>boresight misalignment</i>" e do "<i>lever arm</i>" 	<ul style="list-style-type: none"> - no caso de injeção somente nas coordenadas do CP é necessário um bloco de imagens

QUADRO 03 - CARACTERÍSTICAS DAS DIFERENTES SOLUÇÕES DE GEORREFERENCIAMENTO DE IMAGENS

FONTE :Adaptado de IP (2005)

Segundo Wegmann, Heipke e Jacobsen (2004) o georreferenciamento direto consiste em três passos: calibração, pré-processamento GNSS/INS e a determinação da orientação exterior.

- A calibração inclui, além da determinação dos parâmetros que descrevem individualmente a câmara, também os parâmetros que descrevem a relação desta com os demais sensores (receptor GNSS e INS). Estes parâmetros são: a orientação interior da câmara; a determinação do "braço" (*lever arm*) e a determinação do *boresight misalignment*. O "braço" consiste na determinação do vetor entre o receptor de sinais GNSS, o INS e a câmara. A determinação deste vetor é realizada com facilidade através do emprego de técnicas topográficas. O chamado *boresight misalignment* consiste na determinação de diferenças angulares entre o INS e a câmara. Por tratar-se

de diferenças angulares, a determinação do *boresight misalignment* pode ser realizada pelo método "*two step*", que consiste na comparação da solução fotogramétrica (processo de aerotriangulação utilizando pontos de apoio) com resultados do pré-processamento GNSS/INS (WEGMANN; HEIPKE; JACOBSEN, 2004; YASTIKLI; JACOBSEN, 2005). O *boresight misalignment* pode também ser determinado através da inclusão destes ângulos como incógnitas no processo de aerotriangulação. A Figura 09 apresenta a distribuição dos sensores (GNSS, INS, Laser e câmara) em uma aeronave.

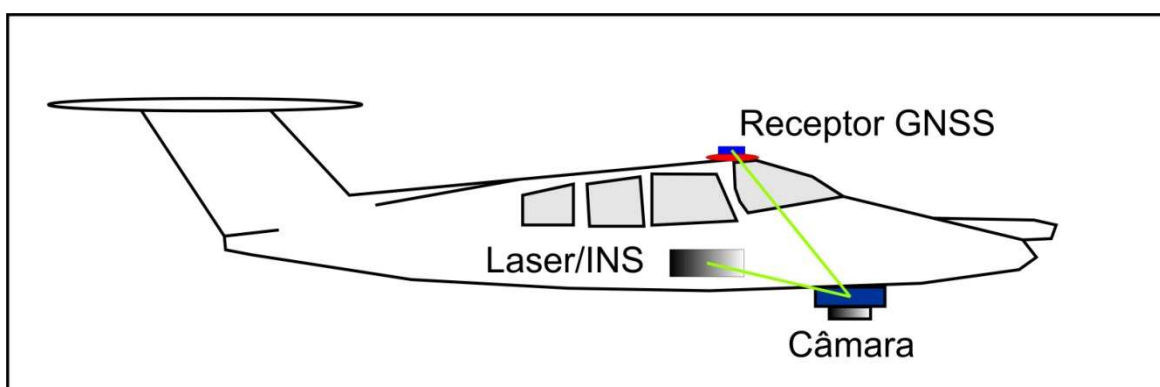


FIGURA 09 - DISPOSIÇÃO LASER/INS, CÂMARA E RECEPTOR GNSS NA AERONAVE
 FONTE: O autor (2011)

- O pré-processamento consiste na integração dos dados GNSS/INS. O método mais comum de realizar essa integração é por meio do filtro de Kalman (LIMA, 2005; MARQUES FILHO 2007; RUY, 2008). O filtro de Kalman é um estimador recursivo, não tendencioso e de variância mínima, sendo utilizado, principalmente, em aplicações que necessitam de processamento em tempo real como na integração de dados GNSS/INS.
- A determinação dos POE da câmera é realizada utilizando os parâmetros de calibração do sensor (braço e *boresight misalignment*) e os valores pré-processados GNSS/INS. Além dos parâmetros de calibração do sensor e dos dados GNSS/INS deve ser considerada a sincronização entre o instante de tomada da imagem e o tempo GNSS/INS (WEGMANN; HEIPKE; JACOBSEN, 2004).

2.4.1. Sistema Inercial

A navegação inercial está baseada nas Leis do Movimento de Newton. A partir da aceleração de um corpo, integrada numericamente em relação ao tempo, é possível a determinação da velocidade. Por sua vez, a integração da velocidade em relação ao tempo fornecerá a informação de deslocamento do sistema de navegação. A orientação (atitude) do sistema pode ser determinada por meio de medições de velocidade angular do sistema de navegação em relação ao tempo.

Este é o princípio básico da navegação inercial e do posicionamento relativo, denominado de *dead reckoning*. No posicionamento relativo, a posição atual do corpo móvel é determinada por meio do conhecimento da posição prévia, da medida da direção do movimento e da distância viajada.

Um sistema de navegação inercial é composto basicamente por uma unidade de medida inercial (*Inertial Measurement Unit* - IMU) e por um processador de navegação. A IMU é composta por três acelerômetros, para a medição de força específica; de três giroscópios, para a detecção de movimentos de rotação além de sensores auxiliares para a calibração. O processador de navegação determina uma posição e orientação inicial utilizando como referência vertical um vetor de gravidade local e como azimuth o norte geográfico. Com base nas medidas provenientes da IMU, o processador de navegação determina a posição, velocidade e atitude da plataforma por meio das equações de movimento.

A principal vantagem da utilização do INS é que ele não depende de sinais externos para a realização de medidas e, por isso, é denominado sistema autocontido (LIMA, 2005). No método absoluto de posicionamento (*positioning fixing*) a posição atual do corpo móvel é obtida a partir de medidas de pontos de referência conhecidos, como, por exemplo por um receptor de sinais GNSS.

Os sistemas INS podem ser classificados em dois tipos de plataforma: *Gimballed* (mecânico) e *Strapdown* (analítico). A plataforma *Gimballed* é um sistema de alta precisão e alto custo, na qual a direção dos eixos de medição é estabilizada no espaço por meio de uma plataforma servo-controlada. Na plataforma *Strapdown* a direção dos eixos de medição acompanha o movimento do veículo que o transporta, sendo os movimentos angulares continuamente medidos pelos giroscópios (LIMA, 2005; MARQUES FILHO, 2007). Os sistemas *Strapdown* não

possuem a complexidade mecânica apresentada pelos sistemas *Gimballed*, possuindo menor custo, peso e dimensão. Devido às características apresentadas, os sistemas *Strapdown* são utilizados em plataformas comerciais, sendo este o tipo de sistema inercial empregado nesta pesquisa.

2.4.1.1 Sistemas Referenciais envolvidos no INS

Baseando-se na Figura 10, podem ser definidos os seguintes sistemas de coordenadas envolvidos no INS (MARQUES FILHO, 2007; BÄUMKER; HEIMES, 2002):

- Sistema do sensor inercial (b): possui origem no centro do conjunto dos sensores. Considerando a plataforma (veículo que transporta o sensor), geralmente o eixo x possui direção no sentido da trajetória da plataforma, o eixo y possui direção para a direita e o eixo z direção vertical à plataforma orientado para baixo.
- Sistema de navegação (n): é representado por um sistema local com origem no centro de gravidade do veículo. O eixo y do sistema de navegação tem orientação na direção norte, o eixo x torna o sistema dextrógiro e o eixo z possui orientação na direção normal ao elipsóide de referência.
- Sistema inercial ou quase inercial (i): possui origem no centro de massa da Terra, o eixo z é paralelo ao eixo de rotação médio da Terra definido em uma determinada data e orientado na direção do norte geográfico, o eixo x possui orientação na direção do equinócio vernal médio e o eixo y completa o sistema ortogonal dextrógiro.
- Sistema terrestre (e): possui origem no centro de massa da Terra, o eixo z é paralelo ao eixo médio de rotação da Terra para uma determinada data e orientado na direção do norte geográfico, o eixo x possui orientação na direção da intercessão entre o Equador e o meridiano de Greenwich, e o eixo y completa o sistema ortogonal dextrógiro. O sistema terrestre possui a mesma origem que o sistema inercial, mas gira com a Terra.

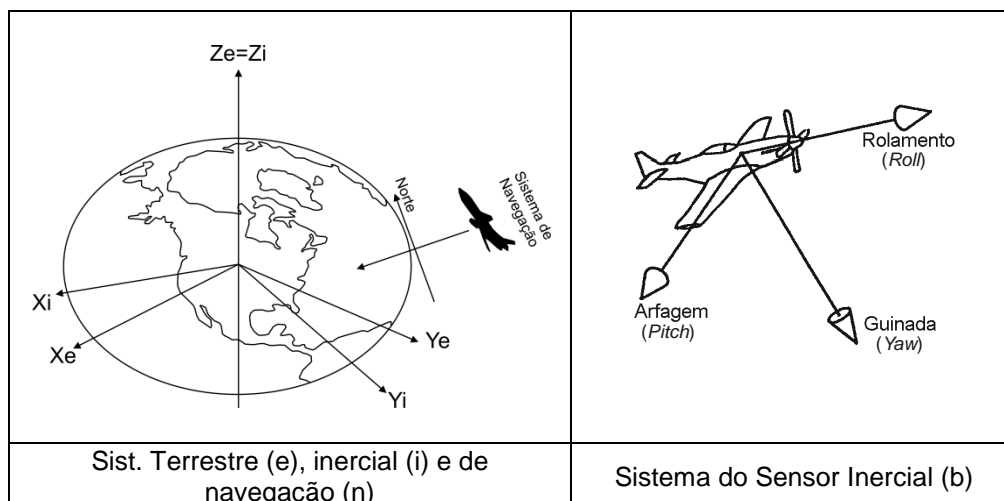


FIGURA 10 - SISTEMAS DE REFERÊNCIA ENVOLVIDOS NO INS

FONTE: Adaptado de MARQUES FILHO (2007), BÄUMKER e HEIMES (2002)

2.4.2 Determinação da atitude e posição da câmara

Os ângulos de atitude dos sensores (*roll*: ϕ , *pitch*: θ e *yaw*: ψ), apresentados na Figura 10 b, são definidos de acordo com o comportamento da aeronave. O sistema de coordenadas do sensor inercial (i) e os ângulos de atitude (ϕ , θ e ψ) medidos pelo INS não coincidem com o sistema de coordenadas de imagem e os ângulos de atitude (ω , φ e κ) empregados em Fotogrametria. A Figura 11 apresenta o sistema de coordenadas de imagem (x, y, z) e o sistema de coordenadas dos sensores (x_b, y_b, z_b).

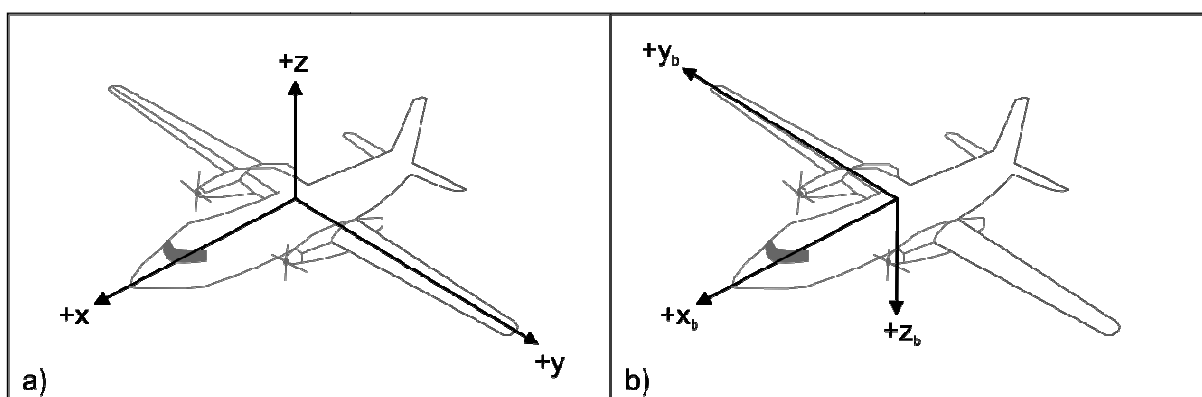


FIGURA 11 - SISTEMA DE COORDENADAS DE IMAGEM (a) SISTEMA DE COORDENADAS DOS SENSORES USADO NA NAVEGAÇÃO (b).

FONTE: Adaptado de BÄUMKER e HEIMES (2002)

A conexão das rotações fotogramétricas com as rotações do sistema inercial é feita utilizando o sistema terrestre fixo (e), o que exige a necessidade da

transformação do sistema do sensor inercial para o sistema de navegação. Esta transformação requer o conhecimento de parâmetros de rotação da Terra e de gravidade, sendo integrada no pré-processamento GNSS/INS (WEGMANN; HEIPKE; JACOBSEN, 2004). A matriz de transformação do sistema do sensor para o sistema de navegação é obtida pela multiplicação de três matrizes de rotação como apresentado na Equação 12 (BÄUMKER; HEIMES, 2002):

$$C_b^n = R_z(\psi).R_y(\theta).R_x(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \psi \cdot \cos \theta & \cos \psi \cdot \sin \theta \cdot \sin \phi - \sin \psi \cdot \cos \phi & \cos \psi \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi + \sin \psi \cdot \sin \phi \\ \sin \psi \cdot \cos \theta & \sin \psi \cdot \sin \theta \cdot \sin \phi + \cos \psi \cdot \cos \phi & \sin \psi \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi - \cos \psi \cdot \sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \cdot \sin \phi & \cos \theta \cdot \cos \phi \end{bmatrix} \quad (12)$$

A relação entre a variação do sistema de navegação e a orientação de seus ângulos pode ser realizada com o uso de um sistema de coordenadas fixas no centro da Terra (e). Na Equação 13 é apresentada a matriz de rotação, que transforma o sistema terrestre (e) para o sistema de navegação (n) (BÄUMKER; HEIMES, 2002).

$$C_e^n = \begin{bmatrix} -\sin \phi \cdot \cos \lambda & -\sin \phi \cdot \sin \lambda & \cos \phi \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ -\cos \phi & -\cos \phi \cdot \sin \lambda & -\sin \phi \end{bmatrix} \quad (13)$$

O sistema de coordenadas de imagem em câmaras analógicas é realizado a partir das marcas fiduciais, e em câmaras digitais a partir do CCD ou CMOS. Ao invés de utilizar o sistema de navegação (n) em Fotogrametria é utilizado o sistema objeto (E). A transformação do sistema objeto (E) para o sistema imagem (B) pode variar dependendo da ordem dos ângulos de rotação. A matriz de rotação apresentada na Equação 14 segue a metodologia adotada por Bäumker e Heimes (2002).

$$C_E^B = R_z(\kappa).R_y(\varphi).R_x(\omega) = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cdot \cos \kappa & \cos \omega \cdot \sin \kappa + \sin \omega \cdot \sin \varphi \cdot \cos \kappa & \sin \omega \cdot \sin \kappa - \cos \omega \cdot \sin \varphi \cdot \cos \kappa \\ -\cos \varphi \cdot \sin \kappa & \cos \omega \cdot \cos \kappa - \sin \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \kappa & \sin \omega \cdot \cos \kappa + \cos \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \kappa \\ \sin \varphi & -\sin \omega \cdot \cos \varphi & \cos \omega \cdot \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (14)$$

Para converter os ângulos do INS (ϕ , θ e ψ) para os ângulos de atitude da câmara (ω , φ e κ) deve-se considerar os diferentes sistemas de coordenadas e ângulos de rotação. Devido à diferença de orientação dos eixos dos sistemas de

coordenadas do INS e da câmara duas matrizes de rotação adicionais devem ser utilizadas (Equação 15) (BÄUMKER; HEIMES, 2002).

$$T_b^B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad T_n^E = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Onde a matriz T_b^B é usada para transformar do sistema sensores (b) para o sistema imagem (B) e vice-versa. A matriz T_n^E é usada para transformar do sistema de navegação (n) para o sistema objeto (E) e vice-versa. No caso de não se utilizar de um sistema de coordenadas plano local, como sistema objeto, ou as correções de curvatura da Terra e desvio de meridiano deve-se utilizar a Equação 16 para compensar estes efeitos (BÄUMKER; HEIMES, 2002).

$$C_n^{n'} = \begin{bmatrix} 1 & e_v & -e_e \\ -e_v & 1 & e_n \\ e_e & -e_n & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} e_n &= -(\lambda_i - \lambda_0) \cdot \cos \varphi \\ e_e &= -(\varphi_i - \varphi_0) \\ e_v &= -(\lambda_i - \lambda_0^{UTM}) \cdot \sin \varphi \end{aligned} \quad (16)$$

Onde:

φ_i, λ_i são as coordenadas geográficas de cada exposição

φ_0, λ_0 são as coordenadas geográficas da origem do sistema plano (*Universal Transversa de Mercator* - UTM)

λ_0^{UTM} é o meridiano central do sistema UTM

Para cada estação de exposição as seguintes matrizes devem ser determinadas utilizando os ângulos ϕ, θ e ψ , as coordenadas geográficas da estação de exposição (φ_i, λ_i) e as coordenadas geográficas da origem do sistema plano (φ_0, λ_0).

$$C_n^{b_i} = f(\phi_i, \theta_i, \psi_i) \quad C_e^{n_0} = f(\varphi_0, \lambda_0) \quad C_e^{n_i} = f(\varphi_i, \lambda_i) \quad (17)$$

$$C_{n_0}^{n'} = f(\varphi_i, \lambda_i, \varphi_0, \lambda_0, \lambda_0^{UTM}) \quad (18)$$

Combinando todas as matrizes de rotação obtém-se uma única matriz (Equação 19) que permite a determinação dos ângulos de atitude da câmara (ω , ϕ e κ):

$$C_E^B = T_b^B \cdot (C_{n0}^{n'} \cdot C_e^{m0} \cdot (C_e^{ni})^T \cdot C_b^{ni})^T \cdot (T_n^E)^T \quad (19)$$

Os ângulos ω , ϕ e κ podem ser determinados com base nos elementos da matriz de rotação C_E^B apresentados na Equação 14.

Além dos sistemas de coordenadas do INS e da câmara terem definições diferentes, os eixos destes sistemas de coordenadas devem ser montados aproximadamente paralelos um ao outro (BÄUMKER; HEIMES, 2002). Deve-se levar em consideração os pequenos desalinhamentos entre o sistema de coordenadas da imagem e o sistema de coordenadas do INS; estes referem-se ao *boresight misalignment*. A Figura 12 apresenta os desalinhamentos e_x , e_y e e_z entre o INS e a câmara

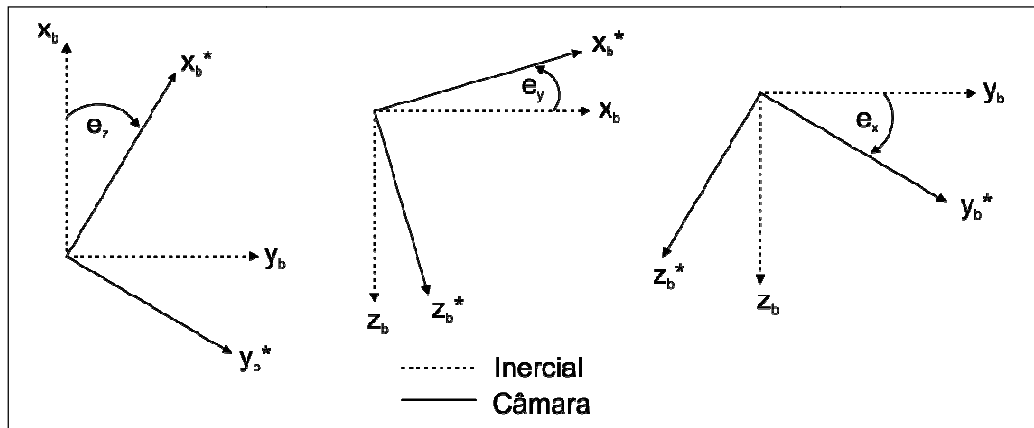


FIGURA 12 - DESALINHAMENTOS e_x , e_y , e_z ENTRE O INS E A CÂMARA
FONTE: Adaptado de BÄUMKER e HEIMES (2002)

Uma matriz de rotação adicional é utilizada para incluir o *boresight misalignment* na equação 19:

$$T_b^{b*} = \begin{bmatrix} 1 & e_z & -e_y \\ -e_z & 1 & e_x \\ e_y & -e_x & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$C_E^B = T_b^B \cdot \left(C_{n0}^{n^*} \cdot C_e^{n0} \cdot \left(C_e^{ni} \right)^T \cdot C_b^{ni} \cdot \left(T_b^{b^*} \right)^T \right)^T \cdot \left(T_n^E \right)^T \quad (21)$$

Se o INS é fixo na câmara o *boresight misalignment* tende a ser constante e a sua determinação pode ser realizada por meio de uma calibração em serviço utilizando um campo de prova. Os ângulos de atitude da câmara são determinados por um processamento de aerotriangulação convencional, e utilizados, juntamente com os ângulos de atitude do INS, em um ajustamento para a determinação do *boresight misalignment* (BÄUMKER; HEIMES, 2002).

Na configuração do sistema de sensores empregado nesta pesquisa a câmara e o sistema inercial não são alinhados, o que impossibilitou a determinação de *boresight misalignment* constantes, ou seja, que possam ser utilizados em diferentes recobrimentos aéreos.

As coordenadas da estação de exposição da câmara (posição do CP) podem ser obtidas por meio da equação de transformação de corpo rígido do espelho do LIDAR para o CP da câmara apresentada na Equação 22:

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_E \\ Y_E \\ Z_E \end{bmatrix} + R(\phi, \theta, \psi) \cdot \begin{bmatrix} \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Onde:

$[X_0, Y_0, Z_0]^T$ são as coordenadas do CP da câmara no sistema de coordenadas do espaço objeto

$[X_E, Y_E, Z_E]^T$ são as coordenadas do espelho do sensor no instante de tomada da imagem no sistema de coordenadas do espaço objeto

ϕ, θ e ψ são os ângulos roll, pitch, yaw

$R(\phi, \theta, \psi)$ é a matriz de rotação do espelho do sensor no instante de tomada da imagem

$[\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0]^T$ é o braço, vetor entre a câmara e o espelho do sistema LIDAR

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados para a execução desta pesquisa e descritas as diferentes metodologias empregadas para a calibração da câmara digital de baixo custo. Será ainda apresentada a metodologia utilizada para a verificação da qualidade dos POI determinados e para a análise das exatidões obtidas com os diferentes processamentos.

3.1 MATERIAIS

Os recursos materiais empregados para a execução desta pesquisa foram disponibilizados pelo CPGCG da UFPR e pelo LACTEC. A seguir, serão descritos os principais programas computacionais, equipamentos e dados utilizados.

3.1.1 Programas Computacionais

O Programa "CALIBRAV", disponível no laboratório de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto da UFPR, foi utilizado para a realização dos processamentos de calibração da câmara e aerotriangulação. Com a plataforma MATLAB versão 5.3 foi desenvolvido um algoritmo para extração de coordenadas altimétricas dos dados provenientes do levantamento LIDAR. O programa KODAK DSC Photo Desk foi utilizado para converter o formato das fotografias de dcr (*Digital Camera Raw*) para o formato tiff (*Tag Image File Format*). O programa *Leica Photogrammetric Suite* 2011 (LPS) foi utilizado para a realização das leituras monoscópicas dos pontos fotogramétricos. O programa R (R, 2009) foi utilizado para a realização dos testes estatísticos. O pacote Microsoft Office 2003 foi empregado para a edição do texto, geração de planilhas, gráficos e apresentações. O programa lastools (ISENBURG, 2011) foi utilizado para a manipulação dos dados da nuvem de pontos LIDAR.

3.1.2 Equipamentos

O CPGCG disponibilizou um Computador Core 2 Duo, com processador T5550, memória RAM de 4,00 GB e disco rígido de 160 GB com sistema operacional Windows Vista® para uso exclusivo na execução desta pesquisa.

Nos levantamentos geodésicos realizados foram empregados dois pares de receptores de sinais GNSS. Os pares de receptores de sinais GNSS, modelos Topcon Hiper Lite+ e Leica série 1200, foram disponibilizados pelo Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG) da UFPR.

A câmara digital de baixo custo, modelo KODAK DCS Pro *Single Lens Reflex/c* (SLR/c), foi disponibilizada pelo LACTEC. Esta câmara possui CMOS com dimensão de 4500x3000 pixels, tamanho de pixel de 8 μm e está equipada com a objetiva da Canon EF 35 mm f/1.4L (Figura 13).



FIGURA 13 - CÂMARA KODAK DCS Pro SLR/c

FONTE: Disponível em <<http://www.dpreview.com/reviews/kodakslrc/>>. Acesso em: 30/05/2010.

O sistema LIDAR ALTM 2050 (*Airborne Laser Terrain Mapper*), de propriedade do LACTEC, é apresentado na Figura 14 e o Quadro 04 descreve as suas principais características.



FIGURA 14 - SISTEMA LIDAR ALTM 2050

FONTE: Disponível em < http://www.nts-info.com/inventory/images/ALTM_2050Optech.Ref702.pdf>
Acesso em: 30/05/2010.

Sistema Inercial	Appanix - 200Hz
Receptor GNSS	Novatel Millennium - L1/L2
Comprimento de Onda do Laser	1064 nm
Tipo de coleta dos dados	Primeiro e último retorno de pulso
Tipo de imagem	Intensidade do retorno (Tons de cinza-8bits)
Altitude de operação	200 m a 2.000 m
Frequência de Varredura	0 até 100 Hz
Ângulo de Varredura	0° a 40°
Número de pontos por m ²	1 a 4 pontos
Precisão Horizontal	0,50 m - 1 sigma a 1.000 m, nominal
Precisão Vertical	0,15 m - 1 sigma a 1.000 m , nominal

QUADRO 04 - ESPECIFICAÇÕES DO SISTEMA LIDAR ALTM 2050

FONTE: Adaptado de MARTINS (2010) e MACHADO (2006)

3.1.3 Implantação do Campo de Prova

Para o estudo das metodologias de calibração aérea proposta nesta pesquisa foi implantado um campo de prova na cidade de Ponta Grossa - PR. Esta região foi escolhida em função da proximidade de um aeroporto com baixo tráfego aéreo e ainda, por tratar-se de uma área urbana, viabilizando a sinalização dos alvos do campo de prova sobre o asfalto dos arruamentos da cidade.

3.1.3.1 Sinalização dos alvos do campo de prova

A dimensão dos alvos pré-sinalizados foi determinada considerando o tamanho do pixel no terreno (*Ground Sample Distance* - GSD) de fotografias tomadas com a câmara KODAK DCS Pro SLR/c em um recobrimento aéreo com altura de voo de 1.000 m. Os 61 alvos possuem formato de círculo com diâmetro de 0,60 m, sendo que esta dimensão corresponde a aproximadamente 3 vezes o tamanho do GSD das fotografias (0,225 m).

Os alvos foram demarcados sobre o asfalto dos arruamentos da cidade, utilizando o molde apresentado na Figura 15a e tinta acrílica branca especial para pisos externos. Como pode ser visualizado na Figura 15b, a maioria dos alvos foi pré-sinalizado próximo ao meio fio dos arruamentos, evitando desta forma que os mesmos fossem destruídos pelo tráfego de veículos e facilitando o levantamento geodésico.

Além disto, procurou-se realizar as sinalizações distantes de edificações e árvores, pois estas poderiam obstruir o sinal do receptor GNSS durante o levantamento das coordenadas geodésicas, como também para minimizar problemas de oclusões durante a aquisição das fotografias aéreas.

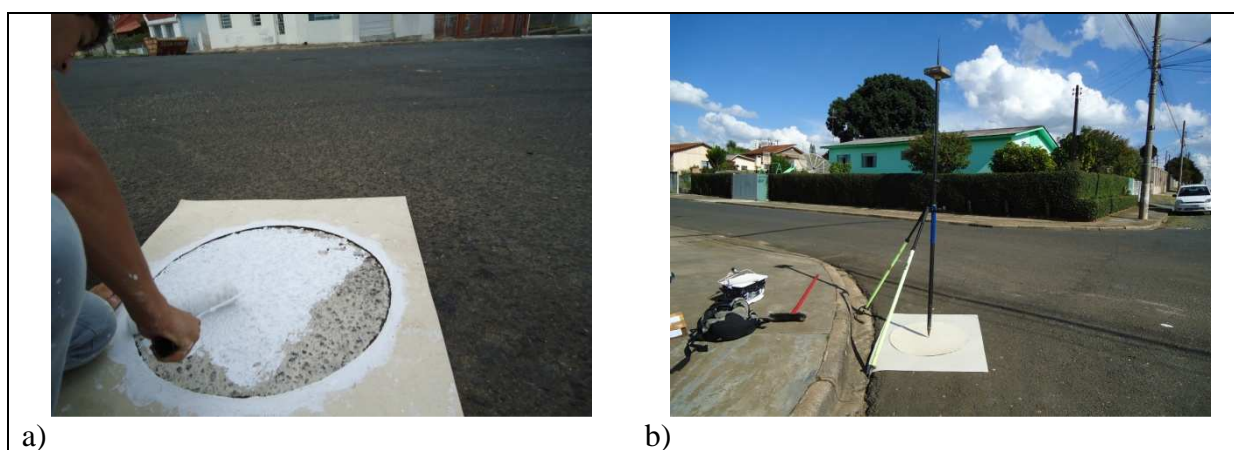


FIGURA 15 - PONTOS PRÉ-SINALIZADOS DO CAMPO DE PROVA

a) MOLDE DOS PONTOS PRÉ-SINALIZADOS. b) FOTOGRAFIA DE UM DOS PONTOS PRÉ-SINALIZADOS

FONTE: O autor (2010)

A distribuição dos alvos do campo de prova foi planejada de forma a viabilizar a realização de recobrimentos aéreos com faixas de voo ortogonais. Desta

maneira, como será exposto na seção 3.1.4.1, a distribuição destes alvos nos arruamentos da cidade se apresenta no formato de uma cruz.

3.1.3.2 Levantamento das coordenadas dos alvos pré-sinalizados

As coordenadas geodésicas dos pontos pré-sinalizados do campo de prova foram determinadas utilizando um par de receptores de sinais GNSS, modelo Topcon Hiper Lite+. Primeiramente, um ponto base foi implantado próximo à área do campo de prova, com observações durante 10 h e 07 min e taxa de gravação de 5 segundos. Para o ajustamento de suas coordenadas foram utilizados dados das estações da Rede Brasileira de Mapeamento Contínuo (RBMC) de Curitiba - PR (UFPR) e de Guarapuava - PR (PRGU). O sistema geodésico utilizado no processamento das coordenadas foi o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000) e a projeção cartográfica UTM.

A pequena distância entre o ponto base e os alvos pré-sinalizados (distância máxima de 3,4 Km) possibilitou que a determinação das coordenadas geodésicas dos alvos fosse realizada com o emprego do método de posicionamento relativo estático rápido. O tempo de ocupação de cada ponto foi de aproximadamente 5 minutos e a taxa de gravação dos dados de 5 segundos.

3.1.4 Recobrimentos Aéreos

Os recobrimentos aéreos utilizados nesta pesquisa foram realizados com a aquisição simultânea dos dados *laser scanner* e de fotografias aéreas empregando-se o sistema de imageamento do LACTEC. A Figura 16 apresenta a disposição do sistema LIDAR ALTM 2050 e da câmara KODAK DCS Pro SLR/c na aeronave. Como pode ser observado, a câmara e o sistema LIDAR são instalados em uma mesma plataforma, sendo a câmara fixada por meio de uma caixa de acrílico. Estes sensores foram conectados fisicamente por um cabo serial RS232 (para maiores detalhes consultar Martins (2010)).

A integração física entre a câmara e o sistema LIDAR viabiliza que o instante de tomada de cada imagem seja registrado ao longo da trajetória GNSS-INS. Desta maneira, o pós-processamento GNSS-INS fornece a posição e orientação do

espelho do sistema LIDAR no instante de tomada de cada imagem. Esta informação associada com a determinação da distância entre a câmara e o sistema LIDAR, permite que as coordenadas das estações de exposição da câmara sejam calculadas.



FIGURA 16 - SISTEMA LIDAR ALTM 2050 E CÂMARA DCS Pro SLR/c INSTALADOS NA MESMA PLATAFORMA
FONTE: MARTINS (2010)

O "braço" (ΔX_0 , ΔY_0 , ΔZ_0), ou seja, o vetor entre a câmara e o centro do espelho, foi determinado por métodos topográficos pelo LACTEC (Tabela 01).

TABELA 01 - VETOR ENTRE A CÂMARA E O ESPELHO (BRAÇO)

ΔX_0 (m)	σ (m)	ΔY_0 (m)	σ (m)	ΔZ_0 (m)	σ (m)
-0,035	0,005	-0,244	0,005	0,055	0,005

Nesta pesquisa as coordenadas da estação de exposição da câmara foram determinadas pelo LACTEC empregando a equação 22, apresentada na página 62. Exemplo de um arquivo com o processamento destas coordenadas é apresentado no Anexo 01.

3.1.4.1 Recobrimento Aéreo do campo de prova de Ponta Grossa

Segundo Wolf e Dewitt (2000) para o enquadramento de alvos de um campo de prova em localizações favoráveis nas imagens, a área de cobertura de cada fotografia deve ser planejada em relação à localização dos alvos. Desta forma, o

planejamento das posições das estações de exposição no espaço objeto foi realizado com base nas configurações da câmara, na localização dos alvos no terreno e na altura de voo. Além disso, foram considerados valores aproximados de 60% para a sobreposição longitudinal e 40 % para a sobreposição lateral.

O recobrimento aéreo do campo de prova foi realizado no dia 30 de maio de 2011. Por se tratar de um recobrimento utilizado para a calibração do sistema LIDAR, este foi realizado com duas alturas de voo (1.000 m e 2.000 m). Considerando que esta pesquisa se propôs em avaliar diferentes metodologias de calibração aérea, as fotografias tomadas a 2.000 m também foram utilizadas nos experimentos realizados.

Como apresentado na Figura 17, o bloco fotogramétrico do campo de prova é composto por: 31 fotografias tomadas a 1.000 m de altura, distribuídas em quatro faixas de voo nas direções aproximadas N - S, S - N, L - O e O - L e; 10 fotografias tomadas a 2.000 m de altura, dispostas em duas faixas de voo nas direções N - S e L - O.

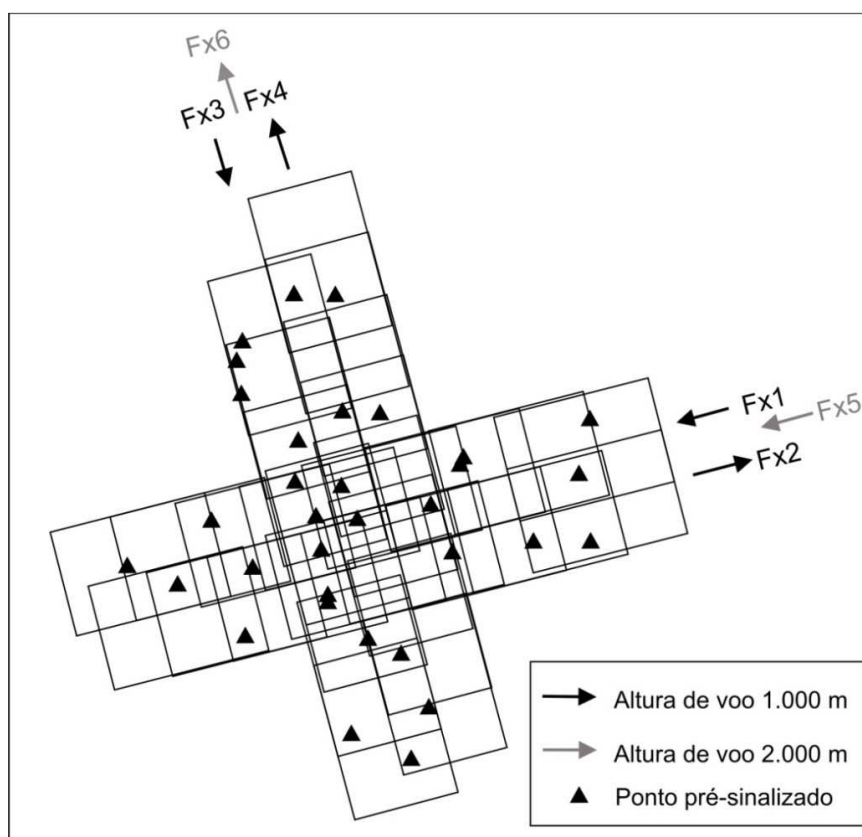


FIGURA 17 - CONFIGURAÇÃO DO BLOCO FOTOGRAMÉTRICO DO CAMPO DE PROVA
FONTE: O autor (2011)

O recobrimento aéreo do campo de prova foi realizado no final da tarde e, apesar do planejamento empregado na implantação dos alvos para minimizar os efeitos de oclusões, a inclinação solar próxima ao horizonte fez com que mesmo baixas edificações e pequenas árvores provocassem regiões de sombra nas imagens. Desta maneira, dos 61 alvos implantados, somente 33 puderam ser identificados nas imagens. Apesar da dimensão dos alvos ter sido baseada no GSD das fotografias tomadas com altura de voo de 1.000 m, foi possível a identificação da grande maioria nas fotografias tomadas com 2.000 m de altura de voo.

A realização do recobrimento aéreo do campo de prova com a aquisição simultânea das imagens fotográficas e dos dados LIDAR possibilitou que uma densa quantidade de pontos *laser scanner* fosse obtida na região central do campo devido à sobreposição entre as faixas. Nas regiões onde não houveram sobreposições o espaçamento entre os pontos coletados foi de 1 ponto a cada 0,65 m, resultando em um número mínimo de aproximadamente 2,37 pontos/m².

Para a realização dessa pesquisa foram utilizados somente os arquivos contendo dados originais provenientes do levantamento *laser scanner* na altura de voo de 1.000 m. Estes arquivos se referem ao MDS da região e são constituídos pelas coordenadas geodésicas de cada ponto, bem como da intensidade de retorno do pulso laser.

Além do MDS, foram disponibilizadas as coordenadas das estações de exposição de todas as imagens do recobrimento aéreo do campo de prova. Essas coordenadas foram determinadas no mesmo referencial dos pontos *laser scanner* contidos no MDS.

3.1.4.2 Recobrimento Aéreo da cidade de Telêmaco Borba

Para a validação das metodologias de calibração propostas nesta pesquisa foram disponibilizados, pelo LACTEC, dados de outro recobrimento aéreo (com a aquisição simultânea de fotografias aéreas e dados do LIDAR). O recobrimento aéreo da cidade de Telêmaco Borba - PR foi realizado no dia 01 de julho de 2010, data anterior ao levantamento da região do campo de prova de Ponta Grossa. Considera-se como ideal para a realização de procedimentos de validação de metodologias de calibração o emprego de um recobrimento aéreo realizado

posteriormente à aquisição daqueles utilizados na calibração da câmara. Porém, devido às dificuldades de tempo hábil para a realização da pesquisa e custos envolvidos, o recobrimento utilizado foi o único disponível no LACTEC, com área urbanizada e características similares às empregadas no recobrimento aéreo do campo de prova.

Na Figura 18 é apresentada a configuração do bloco fotogramétrico, constituído por 8 fotografias aéreas tomadas a 1.000 m de altura e distribuídas em duas faixas de voo nas direções SO - NE e NE - SO. As fotografias possuem sobreposição longitudinal de, aproximadamente, 60% e lateral de 30%.

Além das fotografias aéreas, foram disponibilizados os arquivos contendo os dados originais do levantamento LIDAR (MDS) e o arquivo contendo as coordenadas das estações de exposição das imagens do recobrimento realizado.

3.1.4.2.1 Levantamento de pontos fotoidentificáveis em Telêmaco Borba

As coordenadas geodésicas de 31 detalhes pontuais fotoidentificáveis, geralmente faixas de sinalização de trânsito, foram obtidas utilizando um par de receptores GNSS, modelo Leica série 1200. O ponto utilizado como base para o processamento das coordenadas foi um marco geodésico instalado na região pelo LACTEC. Considerando que este marco está localizado no interior do bloco fotogramétrico, foi possível a determinação das coordenadas geodésicas dos detalhes fotoidentificáveis pelo emprego do método de posicionamento relativo estático rápido. As coordenadas dos pontos fotoidentificáveis foram levantadas com observações de 5 minutos e taxa de gravação de 5 segundos, sendo processadas no sistema de referência SIRGAS 2000 em projeção cartográfica UTM. Na Figura 18 é apresentada a distribuição das fotografias e dos pontos cujas coordenadas foram determinadas no levantamento GNSS.

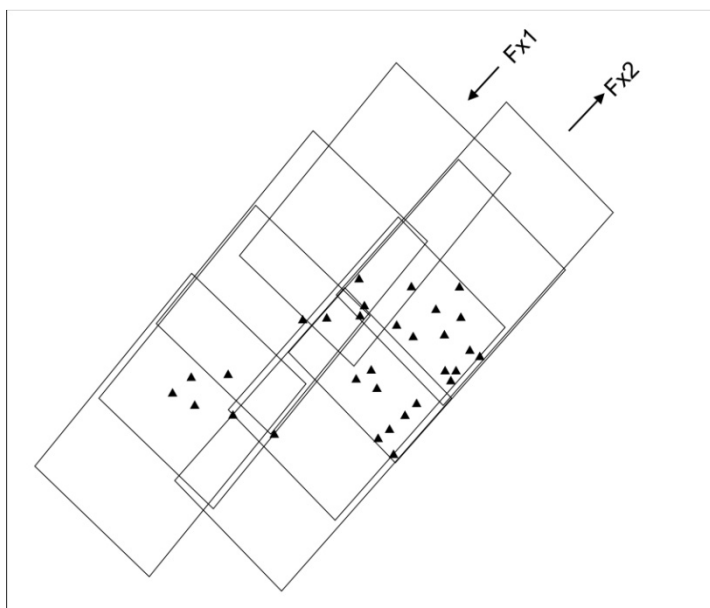


FIGURA 18 - CONFIGURAÇÃO DO BLOCO FOTOGRAMÉTRICO DE TELÊMACO BORBA
FONTE: O autor (2011)

3.2 METODOLOGIA

Esta pesquisa tem como objetivo principal o estudo de diferentes metodologias para a calibração aérea de uma câmara digital de baixo custo integrada a um sistema LIDAR. As metodologias de calibração aérea propostas visam prover um aumento na exatidão e/ou otimização dos trabalhos fotogramétricos realizados com a integração destes sensores no sistema de imageamento do LACTEC. A integração física entre o sistema LIDAR e a câmara possibilita a determinação das coordenadas da estação de exposição da câmara no instante de tomada de cada fotografia. Com a finalidade de minimizar correlações entre POI e POE e de reduzir a quantidade de pontos de apoio, todas as metodologias de calibração aérea propostas nesta pesquisa utilizaram as coordenadas do CP da câmara como injeção de posição no ajustamento.

As imprecisões ligadas com a determinação das coordenadas do CP, tais como as relacionadas com o afastamento da câmara com o centro do espelho de varredura do sistema LIDAR e com a determinação da posição geodésica do espelho (translações - “*lever arm*” e diferenças angulares - “*boresight misalignment*” entre os sensores envolvidos no sistema LIDAR) e também, as relacionadas com o erro de marcação de tempo para a formação da imagem, não foram tratadas de forma independente como é recomendado para o caso da calibração do sistema de

imageamento. Somente foi considerado que as coordenadas do CP da câmara possuem uma imprecisão de 0,10 m nos três eixos, valor esse determinado através de experimentações. Espera-se que somente a calibração óptica possa modelar os erros sistemáticos existentes nas coordenadas do CP. Maiores detalhes sobre a calibração do sistema podem ser consultados em Cramer e Stallman (2001), Honkavaara *et al.* (2002), Yastikli e Jacobsen (2005) e Kersting (2011).

Primeiramente, foi investigado o desempenho de métodos de calibração aérea baseados num campo de prova, com diferentes configurações de faixas de voo, visando a determinação de POI com estabilidade geométrica e que possam ser utilizados em trabalhos fotogramétricos independentes de calibrações em serviço.

Outra metodologia de calibração aérea proposta baseia-se na utilização de recobrimentos aéreos convencionais, ou seja, uma calibração aérea em serviço que não dependa de campo de prova e que, neste caso, a densa e precisa informação altimétrica provida pelo levantamento LIDAR seja utilizada para a definição do apoio altimétrico. A Figura 19 apresenta um fluxo com as diferentes metodologias de calibração aérea.

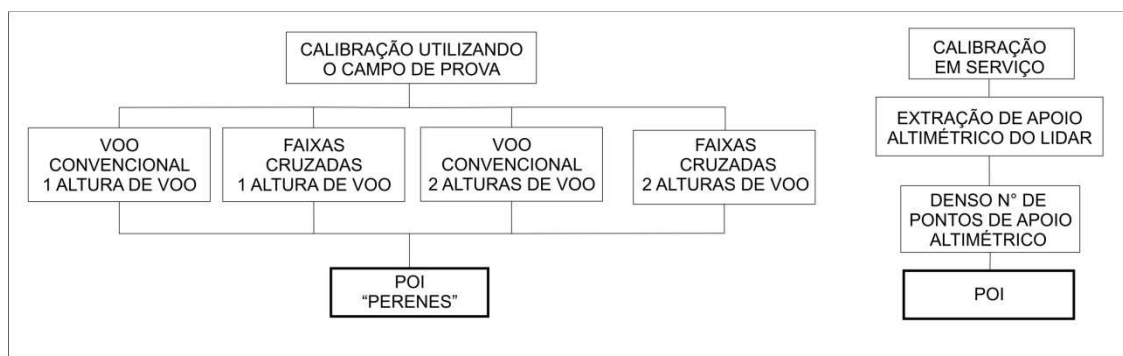


FIGURA 19 - FLUXO DAS METODOLOGIAS PROPOSTAS

FONTE: O autor (2011)

A seguir são detalhadas cada uma das metodologias propostas, bem como o procedimento utilizado para a verificação da qualidade dos POI e as suas exatidões com os diferentes processamentos.

3.2.1 Calibração terrestre

Embora não seja o objetivo principal da presente pesquisa, a câmara KODAK DCS Pro SLR/c foi também calibrada em um campo de prova terrestre pelo

Método das Câmaras Convergentes. Este procedimento adicional foi realizado simplesmente para viabilizar a verificação das exatidões dos processos fotogramétricos empregando POI determinados por calibrações aéreas diante dos resultados com a utilização de POI determinados por calibração terrestre.

Para esta etapa foi utilizado o campo de prova terrestre, implantado no edifício do bloco VI do Centro Politécnico da UFPR. Este campo de prova possui 60 pontos pré-sinalizados distribuídos em uma parede com dimensão de 9,8 m de largura e 7,8 m de altura conforme a Figura 20. As coordenadas locais do campo de prova foram referenciadas a um sistema cartesiano tridimensional dextrógiro, com origem no alvo mais próximo do canto inferior esquerdo, sendo o eixo X orientado para a direita no sentido horizontal, o eixo Y orientado para cima no sentido vertical e o eixo Z ortogonal aos eixos X e Y saindo da parede.

As fotografias do campo de calibração terrestre foram adquiridas no dia 18 de maio de 2011. Foram utilizadas três estações de exposição distintas, sendo que em cada estação foram tomadas 4 fotografias rotacionando a câmara em torno do eixo z ($\kappa = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ e 270°) conforme mostrado na Figura 07, página 43.



FIGURA 20 - CAMPO DE CALIBRAÇÃO TERRESTRE
FONTE: O autor (2010)

3.2.2 Calibração Aérea utilizando o campo de prova

Como já mencionado, o campo de prova, implantado na cidade de Ponta Grossa, foi utilizado para o estudo de metodologias de calibração que possibilitem a

determinação de POI considerados estáveis para futura utilização em trabalhos fotogramétricos independentes.

Por tratar-se de uma calibração aérea "independente", foram realizadas análises sobre as correlações entre POI e POE, uma vez que a existência destas correlações pode influenciar a precisão da determinação dos POI e consequentemente os processamentos posteriores que utilizam destes parâmetros.

Diferentes configurações de blocos fotogramétricos foram experimentadas nas propostas de calibração, variando-se a configuração do recobrimento aéreo e alturas de voo.

3.2.2.1 Calibração com fotografias de um voo convencional

A configuração deste bloco fotogramétrico teve como objetivo avaliar a calibração aérea realizada na condição de um recobrimento fotogramétrico convencional, ou seja, sem o uso de faixas de voo cruzadas e/ou fotografias tomadas com diferentes alturas de voo.

Desta maneira, as 16 fotografias das faixas 1 e 2, apresentadas na Figura 17, foram utilizadas no processamento da calibração aérea. Nesta pesquisa essa metodologia foi denominada de "calibração com voo convencional".

3.2.2.2 Calibração com fotografias de um voo com faixas cruzadas

O experimento teve como objetivo verificar a proposta apresentada por Merchant (1980) de atenuar a correlação entre POI e POE com o uso de pelo menos uma fotografia com variação de 90° no ângulo kappa. O bloco fotogramétrico utilizado é composto por 4 faixas de voo ortogonais tomadas com uma altura de voo, contendo as 31 fotografias das faixas de voo 1,2,3 e 4 apresentadas na Figura 17. Justifica-se a utilização de um recobrimento aéreo elaborado por se tratar de uma metodologia de calibração baseada na utilização de um campo de prova, perfeitamente factível, mas com custos adicionais no processo.

3.2.2.3 Calibração com fotografias com duas alturas de voo

Esta metodologia de calibração tem por objetivo verificar se a utilização de fotografias com diferentes alturas de voo permitem atenuar as correlações entre os POI e POE de forma similar à utilização de faixas cruzadas. Suporta-se o experimento com base na proposta apresentada por Leigh³ (1973) *apud* Andrade e Olivas (1981) de que a utilização de um campo de prova com variação altimétrica entre os alvos de no mínimo 20% da altura de voo viabiliza a minimização das correlações entre POI e POE. E ainda, pela inexistência desta variação no campo de prova implantado, pois a máxima variação entre os alvos não ultrapassa 5% da altura de voo de 1.000 m. O bloco fotogramétrico utilizado neste experimento é composto por 21 fotografias das faixas 1, 2 e 5 apresentadas na Figura 17.

3.2.2.4 Calibração com fotografias com duas alturas de voo e faixas cruzadas

O principal objetivo desta metodologia de calibração aérea é verificar se o uso de faixas cruzadas com diferentes alturas de voo melhoram os resultados obtidos, principalmente quanto à atenuação das correlações entre POI e POE. Neste caso, foram utilizadas todas as faixas de voo do bloco fotogramétrico do campo de prova, resultando em 41 fotografias dispostas em 6 faixas de voo como apresentado na Figura 17. Comparada com as metodologias de calibração aérea anteriores, esta é a que apresenta o maior custo operacional.

3.2.3 Verificação da viabilidade da calibração aérea com número mínimo de pontos de apoio

Dois experimentos de calibração foram realizados com o objetivo de obter resultados para a validação das propostas de calibração em serviço. Utilizou-se nos experimentos o recobrimento convencional de faixas com direções opostas (faixas 1 e 2, Figura 17), sendo que no primeiro, foi utilizado somente 1 ponto de apoio planialtimétrico no centro do bloco e no segundo, dois pontos de apoio, um no início

³ LEIGH, G.E. A **study in improvement of one aspect of the metric camera system**. The Ohio State University, 1973.

e outro no final do bloco. Ambos experimentos utilizaram injunções de posição nas estações de exposição da câmara.

3.2.4 Verificação da viabilidade da calibração aérea utilizando somente pontos de apoio altimétrico

Considerando a possibilidade da utilização de dados provenientes de um levantamento LIDAR no processo de calibração, foram realizados experimentos com dados do campo de prova que têm por objetivo principal avaliar a viabilidade da calibração em serviço empregando pontos de apoio altimétrico. O mesmo bloco fotogramétrico e configurações empregadas no item anterior foram aqui utilizados, mas com a adição de pontos altimétricos nos experimentos. Um terceiro experimento foi realizado sem os pontos de apoio planialtimétrico, empregando somente pontos altimétricos e coordenadas das estações de exposição nas injunções.

3.2.5 Calibração Aérea em Serviço

Esta metodologia de calibração tem por objetivo a determinação dos POI a cada recobrimento aéreo realizado com o sistema. Uma vantagem desta metodologia em relação às outras propostas, é que esta independe de um campo de prova. A metodologia, denominada nesta pesquisa de "calibração em serviço", utiliza da densa informação altimétrica dos dados LIDAR para determinar apoio altimétrico necessário à calibração aérea. Outra vantagem é a determinação de POI levando em conta as condições atmosféricas para o instante da tomada das fotografias, pois segundo Eisenhart⁴ (1963) *apud* Merchant (1980), o método de calibração deve ser tão próximo quanto possível das condições normais de uso do instrumento. E ainda, admitindo-se que câmaras digitais de baixo custo podem apresentar instabilidade geométrica, a calibração realizada de forma periódica, contribuirá consideravelmente com o aumento de exatidão dos processos fotogramétricos.

Os experimentos de calibração empregaram as mesmas configurações de faixas e pontos de apoio planialtimétrico utilizadas no item 3.2.4. A principal

⁴ EISENHART, C. Realistic Evaluation of the Precision and accuracy of instrument calibration system. **Journal of research of the National Bureau of Standards**. v. 67C, n.2, abr/jun, 1963.

diferença com relação aos experimentos realizados no item anterior está na utilização de coordenadas altimétricas interpoladas com base na nuvem de pontos obtida pelo levantamento *laser scanner*, e ainda, de que os pontos de passagem foram utilizados como sendo pontos de apoio altimétrico.

3.2.5.1 Metodologia de extração de coordenadas altimétricas de pontos de passagem

Para atender à metodologia de calibração em serviço, descrita no item 3.2.5 desse trabalho, foi implementado, com base num levantamento *laser scanner*, um procedimento para a extração de coordenadas altimétricas de pontos de passagem. O fluxo das etapas que envolvem o processo é apresentado na Figura 21.

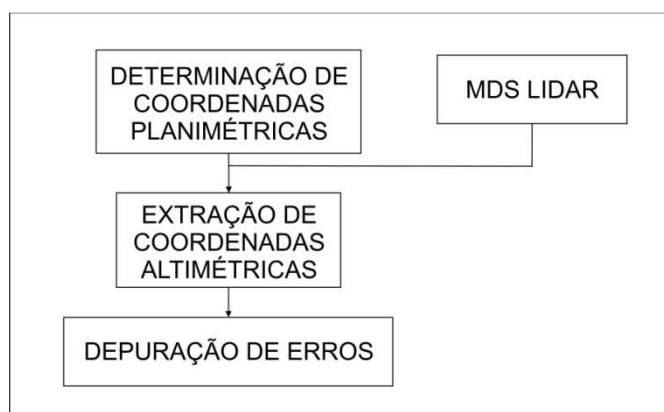


FIGURA 21 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PARA EXTRAÇÃO DE APOIO ALTIMÉTRICO DOS DADOS DO SISTEMA LIDAR
FONTE: O autor (2010)

Etapa 1 – Determinação de coordenadas planimétricas: Uma calibração aérea inicial utilizando-se das coordenadas das estações de exposição e um ponto de apoio, conforme descrito em 3.2.3, foi realizada para a determinação das coordenadas planimétricas dos pontos de passagem existentes no bloco. A utilização de um ponto de apoio no processo será sempre factível, pois a existência de um ponto base é praticamente uma exigência para a geração de um MDS por levantamento *laser scanner*.

Etapa 2 – Extração de coordenadas altimétricas: Utilizando-se das coordenadas planimétricas dos pontos de passagem, determinados na Etapa 1, as coordenadas

altimétricas desses pontos são determinadas através de um processo de interpolação por vizinho mais próximo. O processo de interpolação utiliza a nuvem de pontos original do levantamento *laser scanner*. Considerando-se a densidade média de pontos laser do recobrimento utilizado nessa pesquisa, adotou-se como critério de aceite da interpolação a distância máxima de 0,5 m entre o ponto de passagem e o ponto laser mais próximo. Para prover maior confiabilidade nesse processo de interpolação, somente os pontos de passagem, definidos em locais planos e afastados de edificações e árvores são empregados no processo.

Etapa 3 – Depuração de erros: O procedimento de detecção de erros grosseiros nas coordenadas interpoladas baseou-se em um processamento de aerotriangulação do bloco empregando os POI determinados na Etapa 1. Nesse caso, os pontos fotogramétricos de passagem que tiveram suas coordenadas altimétricas determinadas pelo procedimento descrito na Etapa 2, são aqui considerados como sendo pontos de apoio altimétrico. A verificação da qualidade da coordenada altimétrica interpolada é feita com base na análise dos resíduos resultantes do ajustamento realizado. Valores superiores a duas vezes a exatidão do levantamento laser (0,30 m) são eliminados da condição de apoio altimétrico. Devido à facilidade do ajustamento MMQ distribuir erros nas observações, somente um ponto, o de maior resíduo, é eliminado na análise do processamento realizado. O processo continua até que todos os resíduos dos pontos de apoio fiquem abaixo do valor de tolerância empregado.

3.2.6 Análise da significância dos parâmetros de orientação interior

Segundo Remondino e Fraser (2006), os POI frequentemente utilizados no processo de calibração de uma câmara de baixo custo são os oito termos físicos do modelo originalmente formulado por Brown em 1971 (f , x_0 , y_0 , k_1 , k_2 , k_3 , P_1 , P_2). Assim, em todos os experimentos de calibração realizados nesta pesquisa, estes 8 parâmetros sempre foram inicialmente considerados. Pela análise da matriz variância-covariância (MVC), resultante da calibração, somente os parâmetros significativos são efetivamente considerados. O processo para a eliminação dos

parâmetros que podem ser eliminados do ajustamento (k_3 , P_1 , P_2) é realizado de forma unitária, ou seja, inicia-se com a eliminação do parâmetro menos significativo em cada processamento. O processo termina quando todos os parâmetros são significativos na MVC.

3.2.7 Análise de precisões e exatidões obtidas nos processamentos de calibração e aerotriangulação

A seguir será descrita a metodologia utilizada para analisar a qualidade das calibrações e aerotriangulações realizadas nesta pesquisa.

3.2.7.1 Análise de precisão do ajustamento

As precisões internas do ajustamento foram realizadas com base nas análises da MVC (mostrada no item 3.2.6) e análise dos resíduos. Os valores dos erros quadráticos médios (EQM) dos resíduos das observações foram comparados com o valor de 1/2 do pixel (0,004 mm), tomado como sendo tolerável. Além dessas análises, um teste de hipótese baseado na distribuição qui-quadrado (χ^2), conforme recomenda Gemael (1994), foi realizado para verificar a precisão do ajustamento, ou seja, para testar a hipótese nula de igualdade da variância *a priori* (σ_0^2) com a variância *a posteriori* ($\hat{\sigma}_0^2$) sendo adotada a forma unilateral do teste. As hipóteses testadas são apresentadas na equação 23:

$$\begin{aligned} H_0 : \sigma_0^2 &= \hat{\sigma}_0^2 \\ H_1 : \sigma_0^2 &< \hat{\sigma}_0^2 \end{aligned} \quad (23)$$

A estatística do teste é apresentada na equação 24:

$$\chi_c^2 = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} \cdot gl \quad (24)$$

Associadas com as análises de resíduos, as análises de correlações matemáticas entre os POI e POE determinadas nos ajustamentos foram também realizadas para verificar a qualidade das metodologias de calibrações propostas.

3.2.7.2 Análises de exatidões planimétrica e altimétrica

As análises das exatidões obtidas nas metodologias de calibração e experimentos de aerotriangulação foram realizadas com base na qualidade da determinação tridimensional de pontos no espaço objeto via a intersecção fotogramétrica. Os valores de discrepâncias planialtimétricas de pontos de verificação, determinadas pela comparação entre as coordenadas resultantes do levantamento geodésico e dos processos fotogramétricos, foram calculadas e analisadas.

Adotou-se como exatidão planimétrica esperada na intersecção fotogramétrica o valor de 1 GSD das fotografias tomadas a 1.000 m de altura (0,23 m) e como exatidão altimétrica esperada o valor determinado em função da relação base/altura de voo, conforme apresentada na Equação 25 (ALBERTZ; KREILING, 1980).

$$d_z = \pm \frac{H^2}{B \cdot f} \cdot d_{px} \quad (25)$$

Onde:

d_z é o valor da exatidão altimétrica esperada na intersecção

H é a altura de voo

B é a base fotogramétrica

f é a distância focal

d_{px} é a precisão de medida da paralaxe

Tomando-se como base o bloco fotogramétrico de Ponta Grossa que possui altura média de voo de 1055 m, aerobase média de 404,74 m, distância focal aproximada de 34,242 mm e como precisão de medida da paralaxe de 1 pixel da imagem, calculou-se como exatidão altimétrica esperada o valor de 0,64 m.

Segundo Wolf e Ghilani (1997) a distribuição t de *Student* é usada para comparar a média da população com a média de uma amostra com base no número de graus de liberdade desta amostra. Este teste é empregado quando a amostra é considerada pequena, ou seja, quando o número de observações é menor do que 30. Quando o número de observações é maior ou igual a 30 pode-se empregar o teste z, uma vez que a estatística do teste $\frac{\bar{x}-\mu}{s/\sqrt{n}} \rightarrow \frac{\bar{x}-\mu}{\sigma/\sqrt{n}}$. Desta forma, o teste t de *Student* foi utilizado para verificar se a média das discrepâncias planimétrica e altimétrica é compatível com as exatidões esperadas (0,23 m e 0,64 m). Para a aplicação deste teste estatístico paramétrico, a normalidade dos dados foi verificada pela aplicação do teste de *Shapiro-Wilk* ($\alpha=0,05$). Tendo os dados uma distribuição normal, as seguintes hipóteses foram confrontadas:

$$\begin{aligned} H_0 : \mu &\leq \mu_0 \\ H_1 : \mu &> \mu_0 \end{aligned} \quad (26)$$

A hipótese nula, ou básica (H_0), pressupõe que a média populacional estimada (μ), é menor ou igual à exatidão esperada (μ_0). A hipótese alternativa (H_1) pressupõe que a média populacional estimada é maior que a exatidão esperada (μ_0).

Os valores das médias populacionais da planimetria e altimetria foram calculados em função das estatísticas determinadas pelas discrepâncias planimétricas e altimétricas. A estimativa por intervalo da média populacional, determinada pela equação 27, é feita através da média amostral (\bar{x}), do desvio padrão amostral (S), do tamanho da amostra (n) e da estatística (t_α).

$$\mu \leq \bar{x} + (t_\alpha) \left(\frac{S}{\sqrt{n}} \right) \quad (27)$$

A estatística amostral calculada (t_{calc}) é dada pela equação 28:

$$t_{\text{cal}} = \frac{(\bar{x} - \mu_0)}{\frac{S}{\sqrt{n}}} \quad (28)$$

A hipótese nula não será rejeitada ao nível de significância de α se o valor t_α for maior que a estatística amostral (t_{calc}) (29):

$$t_{cal} < t_{\alpha, gl} \quad (29)$$

No caso dos dados não possuírem uma distribuição normal foi empregado o teste não paramétrico de *Wilcoxon signed-rank test*, que pode ser considerado como equivalente ao teste t de *Student* (DALGAARD, 2008). Neste caso a hipótese testada é:

$$\begin{aligned} H_0 : \eta &\leq \eta_0 \\ H_1 : \eta &> \eta_0 \end{aligned} \quad (30)$$

Onde η é a mediana.

A análise de tendência dos dados analisados foi realizada pela aplicação do teste t de *Student* conforme o Apêndice 01, sendo este teste realizado com as discrepâncias de cada uma das três componentes das coordenadas (ΔX , ΔY e ΔZ).

3.2.8 Validação das Metodologias de Calibração

A verificação das exatidões dos POI, determinados com as metodologias de calibração propostas nessa pesquisa, foi realizada com base nas análises de precisões e exatidões obtidas em experimentos de aerotriangulação, com injeção de peso nas posições do CP da câmara, utilizando as imagens do bloco fotogramétrico da cidade de Telêmaco Borba, descrito no item 3.1.4. Os diferentes conjuntos de POI, provenientes das calibrações realizadas, viabilizam distintas pré-correções dos afastamentos da condição de colinearidade nas observações fotogramétricas e a realização dos diferentes experimentos de aerotriangulação. Entende-se por exatidão dos POI como sendo a capacidade dos mesmos em recuperar a geometria projetiva das imagens tomadas em locais, épocas e condições atmosféricas completamente diferentes daquelas que foram utilizadas nas calibrações realizadas. Os resultados obtidos com esses experimentos foram

analisados e discutidos para fins de conclusões sobre as exatidões alcançadas pelo sistema fotogramétrico utilizando POI determinados de forma independente.

Associado com os experimentos propostos anteriormente para a verificação dos POI determinados com base no campo de prova, foi realizado um experimento de aerotriangulação com a calibração em serviço do bloco fotogramétrico de Telêmaco Borba, empregando a mesma metodologia descrita no item 3.2.5.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões das diferentes metodologias de calibração da câmara digital de baixo custo. As metodologias de calibração avaliadas nessa pesquisa foram direcionadas para melhorar o desempenho de trabalhos realizados com os dados provenientes do sistema de imageamento do LACTEC (câmara digital integrada fisicamente ao sistema LIDAR). A configuração destes sensores possibilitou que a posição do CP da câmara fosse utilizada como injeção nos ajustamentos das calibrações. A aquisição simultânea de fotografias aéreas e da nuvem de pontos LIDAR possibilitou que a rica e precisa informação altimétrica, provida pelo levantamento LIDAR, fosse utilizada para a determinação de apoio altimétrico na calibração em serviço.

Os resultados obtidos com a calibração terrestre da câmara são apresentados e discutidos na seção 4.1. Na seção 4.2 são analisados os experimentos de calibração aérea baseados no campo de prova utilizando diferentes configurações de blocos fotogramétricos. A verificação da viabilidade da calibração aérea utilizando número mínimo de pontos de apoio é realizada na seção 4.3 e pontos de apoio altimétrico na seção 4.4. Na seção 4.5 são apresentados e discutidos os experimentos de calibração em serviço e, na seção 4.6 são validadas as metodologias de calibração propostas.

4.1 RESULTADOS OBTIDOS NA CALIBRAÇÃO TERRESTRE

A câmara KODAK DCS Pro SLR/c foi calibrada pelo Método das Câmaras Convergentes utilizando o campo de prova terrestre existente na UFPR. Este procedimento foi realizado com a finalidade de comparar as exatidões obtidas em processamentos fotogramétricos empregando os POI determinados na calibração terrestre e nas calibrações aéreas.

As 12 imagens utilizadas para a calibração terrestre foram adquiridas de acordo com a metodologia apresentada na seção 3.2.1. Os 60 alvos do campo de prova terrestre foram medidos nas imagens por procedimento monoscópico manual utilizando o software LPS.

No ajustamento realizado para recuperar os POI da câmara empregou-se como variância *a priori* o valor unitário, como desvio padrão das fotocoordenadas 1/2 pixel (0,004 mm) e como desvio padrão das coordenadas dos pontos de apoio 1 mm (precisão obtida no levantamento das coordenadas dos alvos). A Tabela 02 apresenta os valores dos POI significativos na análise da MVC do ajustamento da Calibração Terrestre (CT) e os seus desvios padrão.

TABELA 02 - POI DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO TERRESTRE

	f (mm)	σf (mm)	x_0 (mm)	σx_0 (mm)	y_0 (mm)	σy_0 (mm)	k_1 (mm ⁻²)	σk_1 (mm ⁻²)	k_2 (mm ⁻⁴)	σk_2 (mm ⁻⁴)
CT	34,145	0,020	0,089	0,008	0,217	0,008	-9,413E-05	1,542E-06	1,091E-07	4,326E-09

Na Tabela 03 são apresentados os EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio, o EQM dos resíduos das fotocoordenadas, os graus de liberdade, a variância *a posteriori* e o resultado do teste global do ajustamento da CT. O teste global, que tem como finalidade analisar a qualidade do ajustamento da calibração, foi realizado pelo emprego do teste do qui-quadrado com intervalo de confiança de 95%.

TABELA 03 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CALIBRAÇÃO TERRESTRE

EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio					
EQM X (m)		EQM Y (m)		EQM Z (m)	
0,001		0,001		0,001	
EQM dos resíduos das fotocoordenadas e Teste Global					
EQM x (mm)	EQM y (mm)	gl	$\hat{\sigma}_0^2$	χ_a^2	$\chi_{(gl,1-\alpha)}^2$
0,003	0,003	838	0,721	604,198	1142,000

Pela comparação unilateral do teste qui-quadrado, para um nível de significância de 5%, o resultado não foi rejeitado estatisticamente, pois $\chi_a^2 \leq \chi_{(gl,1-\alpha)}^2$. Considerando os EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio, verifica-se que os valores encontram-se dentro das precisões admitidas (1 mm). Os EQM dos resíduos das fotocoordenadas também são inferiores ao valor de desvio padrão tolerável (0,004 mm). Esses valores permitem concluir que as medidas manuais dos pontos fotogramétricos realizadas no software LPS, encontram-se de acordo com as precisões admitidas no processo. A Tabela 04 apresenta a matriz de correlação entre os POI determinados na calibração terrestre da câmara. Nesta pesquisa adotou-se como sendo correlação alta o valor próximo ou superior a 0,7 (correlação

de 70%). Valores de correlação maiores ou iguais a essa tolerância são apresentados em negrito.

TABELA 04 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO TERRESTRE

Matriz de Correlação dos POI					
	f	x_0	y_0	k_1	k_2
f	1,000				
x_0	-0,054	1,000			
y_0	0,158	0,014	1,000		
k_1	-0,247	0,322	-0,065	1,000	
k_2	0,216	-0,315	0,029	-0,913	1,000

Analisando a Tabela 04 verifica-se a ocorrência de elevada correlação entre os parâmetros k_1 e k_2 da distorção radial simétrica. A forte correlação destes parâmetros indica que grande parcela do efeito da distorção radial simétrica poderia ser modelada somente pelo parâmetro k_1 . Porém, como ambos os parâmetros foram significantes na MVC, a permanência do parâmetro k_2 é necessária para a modelagem da distorção radial simétrica.

A Tabela 05 apresenta as médias em módulo das correlações entre POI e POE determinados na calibração terrestre.

TABELA 05 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE DETERMINADOS NA CT

Correlação entre POI e POE					
	f	x_0	y_0	k_1	k_2
ω	0,065	0,228	0,243	0,119	0,107
φ	0,149	0,227	0,226	0,095	0,099
κ	0,048	0,226	0,236	0,093	0,083
X_0	0,502	0,132	0,170	0,094	0,096
Y_0	0,177	0,133	0,126	0,063	0,050
Z_0	0,658	0,027	0,111	0,054	0,056

Analisando a matriz de correlação cruzada apresentada na Tabela 05 observa-se que, embora nenhuma correlação tenha sido superior a 0,7, o maior valor refere-se à correlação da distância focal com a coordenada Z_0 da estação de exposição. Côrtes (2010) verificou correlações similares em processamentos de calibração terrestre, concluindo que quanto maior o ângulo de convergência entre as fotografias, menor é a correlação estatística entre a distância focal e a coordenada de exposição Z_0 (afastamento horizontal do campo de prova até a câmara). Desta forma, pode-se concluir que a convergência utilizada na tomada das imagens encontra-se próxima da recomendada para o processo de calibração pelo Método

das Câmaras Convergentes. Maiores informações sobre este método consultar Andrade (2003).

Pelos resultados obtidos no processo os POI foram determinados com as precisões requeridas e não apresentaram correlações matemáticas significativas com os POE. Desta forma, esses parâmetros podem ser admitidos como representativos da realidade física do sistema óptico da câmara empregada nesta pesquisa, viabilizando a sua utilização em processos fotogramétricos independentes. Esta condição pode ser admitida desde que estes parâmetros se mantenham estáveis e não sofram variações quando expostos a diferentes condições de temperatura e pressão

4.2 RESULTADOS OBTIDOS NAS CALIBRAÇÕES AÉREAS UTILIZANDO O CAMPO DE PROVA

Como já mencionado o campo de prova, implantado na cidade de Ponta Grossa, foi utilizado para a realização de experimentos de Calibração Aérea (CA) da câmara de baixo custo. Nestes experimentos foram empregadas diferentes configurações de bloco fotogramétrico visando a obtenção de uma que possibilite a melhor determinação de POI para serem empregados em trabalhos fotogramétricos independentes de calibrações em serviço.

Nas calibrações aéreas realizadas empregou-se como variância *a priori* do ajustamento o valor unitário. Foi utilizado como desvio padrão das fotocoordenadas 1/2 pixel (0,004 mm), sendo a leitura dos pontos fotogramétricos realizada de forma monoscópica manual no programa LPS. A transferência destes pontos para as demais imagens foi realizada pelo processo de correlação automática (LSM - *Least Squares Matching*) no programa LPS. Os desvios padrão obtidos nas coordenadas dos pontos de apoio no levantamento GNSS foram, aproximadamente, os valores de 0,021 m em X, 0,021 m em Y e 0,034 m em Z. Nos experimentos de calibração foi adotada como precisão o valor único de 0,030 m para as três componentes. Foi adotado o valor empírico de 0,10 m como precisão das coordenadas do CP da câmara.

Todos os experimentos foram realizados empregando um conjunto de pontos de apoio pré-sinalizados como sendo pontos de verificação. O número

desses pontos variou em função da configuração do bloco fotogramétrico do experimento. A Figura 22 apresenta a distribuição dos pontos pré-sinalizados que foram utilizados como pontos de apoio e como pontos de verificação nas calibrações realizadas.

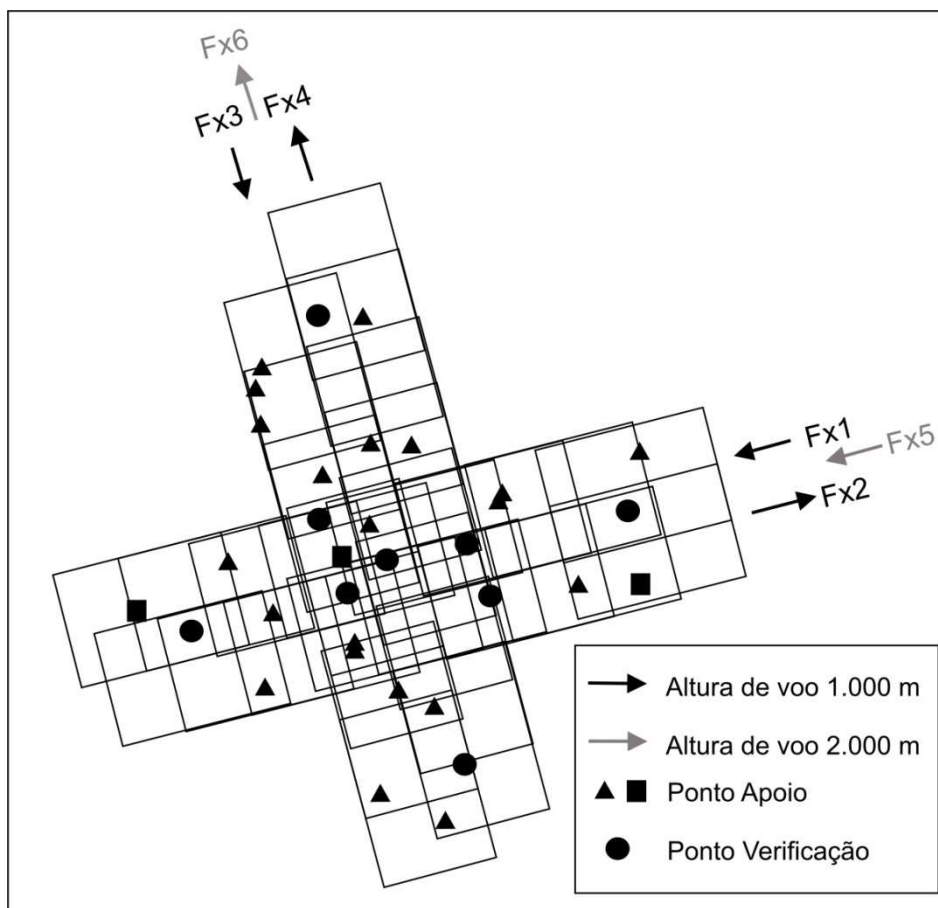


FIGURA 22 - DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS PRÉ-SINALIZADOS UTILIZADOS COMO APOIO E COMO VERIFICAÇÃO NAS CALIBRAÇÕES AÉREAS
FONTE: O autor (2011)

4.2.1 Calibração aérea utilizando fotografias de um voo convencional

Inicialmente, foi realizado um experimento de calibração aérea somente com as fotografias pertencentes as faixas 1 e 2 apresentadas na Figura 22. A configuração deste bloco teve como objetivo se obter a condição de um recobrimento fotogramétrico convencional, ou seja, sem o uso de faixas de voo cruzadas ou fotografias tomadas com diferentes alturas de voo. Neste experimento, denominado de CA1, foram utilizados 13 pontos de apoio planialtimétrico distribuídos homogeneamente nas faixas 1 e 2 (triângulo e quadrado na Figura 22).

Além dos 13 pontos de apoio, foram planejados 96 pontos fotogramétricos de passagem e 7 pontos de verificação. Na Tabela 06 são apresentados os POI significativos na análise da MVC do ajustamento e os respectivos desvios padrão.

TABELA 06 - POI DETERMINADOS NA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL

	f (mm)	σ_f (mm)	x_0 (mm)	σ_{x_0} (mm)	y_0 (mm)	σ_{y_0} (mm)	k_1 (mm ⁻²)	σ_{k_1} (mm ⁻²)	k_2 (mm ⁻⁴)	σ_{k_2} (mm ⁻⁴)
CA1	34,246	0,002	0,067	0,002	0,262	0,005	-9,101E-05	5,639E-07	1,043E-07	1,342E-09

Observa-se nessa calibração que os valores obtidos para a distância focal e as coordenadas do PP são bem diferentes daqueles determinados na CT. Tais diferenças podem ser consideradas como sendo esperadas devido às inexatidões das coordenadas dos CP das imagens do bloco e a forte correlação entre essas e os parâmetros determinados. Comparando-se os outros parâmetros verifica-se pequena variação nos parâmetros que modelam a distorção radial simétrica. Esperava-se uma maior variação nesses parâmetros em função do efeito da refração fotogramétrica na calibração aérea que não foi pré-corrigida com a atmosfera padrão. Por outro lado, verifica-se que a distância focal foi o parâmetro que apresentou maior variabilidade (aproximadamente 0,101 mm) entre os POI determinados. Essa variação associada com os valores obtidos de correlação entre a distância focal e parâmetros de distorção radial (k_1 e k_2), apresentadas na Tabela 08, permitem concluir-se que pode ter havido uma absorção dos efeitos da refração fotogramétrica na determinação da distância focal. Contudo, como já mencionado, a variabilidade também pode estar relacionada com a imprecisão da coordenada (Z_0) do CP.

As variações nos POI determinados na CT e na CA1 podem estar relacionadas com as diferentes condições climáticas (temperatura e pressão) em que as imagens foram adquiridas e ainda com o manuseio da câmara na tomada das imagens do campo de prova terrestre. Análises posteriores poderão refinar as conclusões apresentadas sobre a variabilidade nesses parâmetros.

Na Tabela 07 são apresentados o EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio, o EQM dos resíduos das fotocoordenadas, os graus de liberdade, a variância *a posteriori* e o resultado do teste global.

TABELA 07 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CA COM FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL

EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio e CPs					
EQM X (m)	EQM Y (m)	EQM Z (m)	EQM X ₀ (m)	EQM Y ₀ (m)	EQM Z ₀ (m)
0,005	0,004	0,002	0,037	0,025	0,072
EQM dos resíduos das fotocoordenadas e Teste Global					
EQM x (mm)	EQM y (mm)	gl	$\hat{\sigma}_0^2$	χ_a^2	$\chi_{(gl, 1-\alpha)}^2$
0,001	0,002	449	0,304	136,496	499,401

Pela análise da Tabela 07 conclui-se que os resultados obtidos no ajustamento da calibração aérea não foram rejeitados para um nível de significância de 5%. Considerando o EQM dos resíduos das fotocoordenadas, provenientes do processo de calibração, verifica-se que estes são inferiores ao valor de precisão tolerável (0,004 mm) adotada para as medidas realizadas. Os EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio e das coordenadas do CP encontram-se de acordo com as precisões admitidas no processo (0,03 m e 0,10 m). Na Tabela 08 são apresentadas as correlações entre os POI determinadas no experimento de calibração realizado.

TABELA 08 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL

Matriz de Correlação dos POI					
	f	x ₀	y ₀	k ₁	k ₂
f	1,000				
x ₀	0,039	1,000			
y ₀	0,124	0,006	1,000		
k ₁	-0,761	-0,005	0,076	1,0000	
k ₂	0,677	-0,003	-0,154	-0,972	1,000

Assim como observado na calibração utilizando o campo de prova terrestre, a elevada correlação entre os parâmetros k₁ e k₂ da distorção radial simétrica, conforme já explanado, foi considerada normal uma vez que os parâmetros foram significativos na MVC.

Observa-se ainda, a existência de correlações não tão significativas (próximas de 0,7) entre a distância focal e os parâmetros de distorção radial simétrica, como discutido anteriormente. A existência de correlações entre os POI não afetará os resultados da utilização dos POI numa aplicação fotogramétrica independente, pois esses são sempre utilizados em conjunto. Diferente para o caso de correlações entre POI e POE que mostra uma possível imprecisão na determinação do POI, ou seja, o valor de POI determinado pode ter a influência de

elementos externos à geometria da câmara, como é mostrado na Tabela 09. Verifica-se uma elevada correlação (média absoluta) entre os parâmetros ω com y_0 . Este valor demonstra que o parâmetro y_0 foi determinado sem certeza de significado físico, pois pode possuir parcela do movimento angular ω . Estando os CP injuncionados, movimentos angulares foram necessários para a fixação tridimensional dos raios de luz nos pontos de apoio, sendo estes, também fixos com a utilização de injunções de posição.

TABELA 09 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE DETERMINADOS NA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL

Correlação entre POI e POE					
	f	x_0	y_0	k_1	k_2
ω	0,116	0,085	0,919	0,073	0,146
φ	0,043	0,524	0,483	0,043	0,077
κ	0,019	0,026	0,067	0,021	0,026
X_0	0,011	0,073	0,014	0,013	0,014
Y_0	0,006	0,021	0,023	0,008	0,008
Z_0	0,070	0,048	0,042	0,024	0,028

Para verificar a exatidão da calibração realizada foram utilizados 7 pontos de verificação (pontos simbolizados com círculos pertencentes as faixas 1 e 2 da Figura 22). As discrepâncias planialtimétricas desses pontos foram calculadas para análises estatísticas. Os valores das médias e EQM das discrepâncias planimétricas e altimétricas são apresentados na Tabela 10 e Figuras 23 e 24.

TABELA 10 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CA COM FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL

Discrepância Planimétrica		Discrepância Altimétrica	
Média (m)	EQM (m)	Média (m)	EQM (m)
0,064	0,079	-0,109	0,221

A Figura 23 apresenta um gráfico com as discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação. Os círculos concêntricos, apresentados na Figura 23, representam o tamanho de um e de dois GSD das fotografias, ou seja, 0,23 e 0,46 m. Observa-se que todos os pontos de verificação possuem discrepâncias planimétricas inferiores a 1 GSD. Pode-se também observar pela Figura 23 e pelo teste de tendência t de *Student* (apresentado no Apêndice 01) que a distribuição das discrepâncias planimétricas não apresentou tendência.

A Figura 24 apresenta um gráfico com as discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação. Observa-se que as discrepâncias altimétricas de todos os pontos de verificação foram inferiores ao valor de 0,64 m, valor adotado como exatidão altimétrica esperada de acordo com a metodologia apresentada na seção 3.2.7.2. Pelo teste estatístico realizado estas discrepâncias não apresentaram tendência (Apêndice 01).

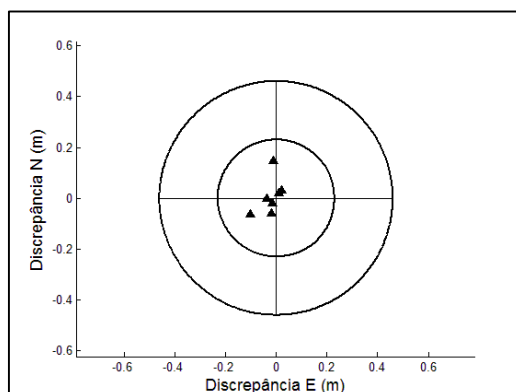


FIGURA 23 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL

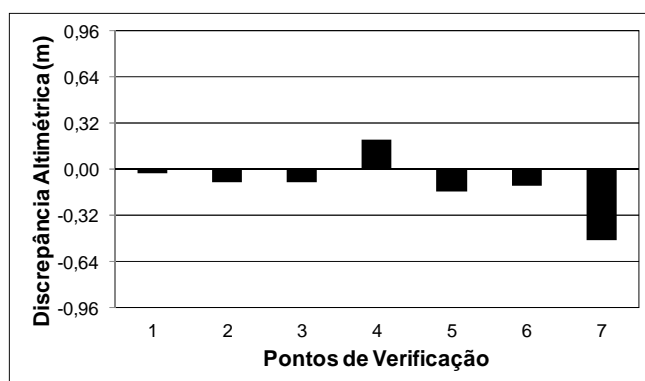


FIGURA 24 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL

Para confirmar as conclusões obtidas, através das análises dos resultados das exatidões planimétricas e altimétricas realizadas com auxílio das representações gráficas, mostradas nas Figuras 23 e 24, foram realizados testes estatísticos. Inicialmente, a normalidade dos dados foi testada pelo emprego do teste de *Shapiro-Wilk*. Considerou-se nesse teste que uma amostra apresenta distribuição normal, com 95% de confiança, quando o p valor calculado é maior que 0,05.

TABELA 11 - TESTES DE HIPÓTESE PARA AS EXATIDÕES DA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL

Testes da Exatidão Planimétrica			Testes da Exatidão Altimétrica		
Teste de Normalidade (p valor)	t_{calc}	t_{α}	Teste de Normalidade (p valor)	t_{calc}	t_{α}
0,071	-8,820	1,943	0,036	-8,117	1,943

Na Tabela 11, verifica-se que o p valor calculado no teste de normalidade das discrepâncias planimétricas foi maior que 0,05, confirmando a hipótese de normalidade das discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação. Pela análise do resultado estatístico do teste t de *Student*, referente à avaliação da exatidão planimétrica obtida, verifica-se que o experimento alcançou a exatidão tolerável nos pontos de verificação. Como o valor calculado para a distribuição t foi menor que o valor tabelado, a hipótese H_0 não foi rejeitada, ou seja, a média populacional das discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação resultantes da calibração aérea pode ser considerada estatisticamente inferior ou igual a 0,23 m.

Observa-se pela Tabela 11 que as discrepâncias altimétricas (valores absolutos) obtidas no experimento não possuem uma distribuição normal em relação a sua média, pois o p valor determinado pelo teste de normalidade *Shapiro-Wilk* foi inferior a 0,05. Devido a não normalidade das discrepâncias altimétricas, o teste não paramétrico de *Wilcoxon* foi realizado para verificar se a média populacional é igual ou inferior ao valor de exatidão altimétrica admitida. Nesse teste, o p valor resultante foi 1, ou seja, H_0 não é rejeitada o que corrobora com o resultado obtido pelo teste paramétrico t de *Student*, admitindo-se ser uma distribuição normal, pois o p valor calculado no teste de *Shapiro-Wilk* encontra-se próximo de 0,05. Com base neste resultado, pode-se afirmar com 95% de confiança que a média populacional das discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação desta calibração é igual ou inferior a 0,64 m.

Admitindo-se ser o experimento uma avaliação de calibração em serviço, pode-se afirmar que as condições impostas no processo (voo convencional, pontos de apoio sinalizados, injunções nos CP) viabilizaram a obtenção de exatidões de acordo com os limites de tolerância empregados. Experimentos posteriores verificarão se os resultados de aerotriangulações de blocos de outras áreas,

empregando os POI determinados, apresentam exatidões similares às que foram aqui obtidas.

4.2.2 Calibração aérea utilizando fotografias de um voo com faixas cruzadas

Este experimento foi realizado com a finalidade de avaliar o desempenho da calibração com o emprego de faixas de voo cruzadas, principalmente quanto à atenuação das correlações entre POI e POE. De acordo com Honkavaara *et al.* (2002), o emprego de blocos fotogramétricos com faixas de voo cruzadas possibilitou a determinação de POI de maior confiabilidade e estabilidade.

Neste experimento, denominado de CA2, foram utilizadas as fotografias que compõem as faixas 1, 2, 3 e 4 do bloco fotogramétrico e os 24 pontos de apoio apresentados como triângulo e quadrado na Figura 22. Além dos 24 pontos de apoio, foram planejados 154 pontos fotogramétricos de passagem e 9 pontos de verificação. A Tabela 12 apresenta os POI e os desvios padrão resultantes desta calibração.

TABELA 12 - POI DETERMINADOS NA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO COM FAIXAS CRUZADAS

	f (mm)	σ_f (mm)	x_0 (mm)	σ_{x_0} (mm)	y_0 (mm)	σ_{y_0} (mm)	k_1 (mm ⁻²)	σ_{k_1} (mm ⁻²)	k_2 (mm ⁻⁴)	σ_{k_2} (mm ⁻⁴)
CA2	34,248	0,001	0,064	0,001	0,272	0,002	-9,121E-05	3,677E-07	1,044E-07	8,779E-10

Comparando-se os resultados obtidos nas calibrações aéreas, verifica-se que as variações dos POI, encontram-se próximas das suas precisões de determinação dos parâmetros, a menos do valor de y_0 que nesse caso, a variação entre os valores é um pouco maior (0,010 mm). A maior variação nesse parâmetro era esperada, pois como foi visto na primeira calibração aérea (CA1), o parâmetro y_0 foi o que teve correlação com o ângulo de rotação ω e apresentou menor precisão de determinação (0,005 mm). Verifica-se nessa segunda calibração aérea (CA2), conforme mostrado na Tabela 15, que a correlação entre esses parâmetros foi atenuada, melhorando a precisão de determinação do parâmetro y_0 (0,002 mm). Apesar da existência de elevada correlação entre y_0 e ω no experimento CA1, a diferença do valor desse parâmetro entre as duas calibrações não foi tão elevada

(0,010 mm), mostrando que a correlação, nesse caso, não prejudicou a determinação do parâmetro.

A Tabela 13 apresenta os EQM resultantes das análises realizadas dos resíduos das observações do ajustamento, os graus de liberdade, o sigma a *posteriori* e o resultado do teste global de variâncias realizado. Observa-se pela análise dos EQM e do resultado do teste global que as observações realizadas encontram-se dentro das precisões admitidas no processo.

A Tabela 14 apresenta a matriz de correlação entre os POI determinados neste processamento. Os parâmetros de distorção radial simétrica não modificaram significativamente em relação à calibração CA1. Igualmente, a correlação entre os parâmetros k_1 e k_2 da distorção radial simétrica, considerada normal, não se alterou. No caso das correlações desses parâmetros com a distância focal, verificam-se valores similares dos que foram obtidos na calibração CA1. As conclusões das causas dessas correlações podem ser as mesmas apresentadas na calibração CA1.

TABELA 13 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO COM FAIXAS CRUZADAS

EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio e CPs					
EQM X (m)	EQM Y (m)	EQM Z (m)	EQM X_0 (m)	EQM Y_0 (m)	EQM Z_0 (m)
0,005	0,005	0,003	0,034	0,035	0,068
EQM dos resíduos das fotocoordenadas e Teste Global					
EQM x (mm)	EQM y (mm)	gl	$\hat{\sigma}_0^2$	χ_a^2	$\chi_{(gl,1-\alpha)}^2$
0,001	0,002	972	0,281	272,743	1045,642

TABELA 14 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO COM FAIXAS CRUZADAS

Matriz de Correlação dos POI					
	f	x_0	y_0	k_1	k_2
f	1,000				
x_0	-0,014	1,000			
y_0	0,021	0,033	1,000		
k_1	-0,774	0,072	0,051	1,000	
k_2	0,695	-0,088	-0,102	-0,973	1,000

Na Tabela 15 são apresentadas as médias em módulo das correlações entre POI e POE determinados na calibração aérea utilizando faixas de voo cruzadas.

TABELA 15 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE DETERMINADOS NA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO COM FAIXAS CRUZADAS

Correlação entre POI e POE					
	f	x_0	y_0	k_1	k_2
ω	0,016	0,283	0,554	0,035	0,056
φ	0,018	0,294	0,540	0,036	0,054
κ	0,012	0,024	0,035	0,011	0,014
X_0	0,006	0,036	0,015	0,007	0,008
Y_0	0,006	0,032	0,019	0,006	0,007
Z_0	0,056	0,034	0,036	0,024	0,027

Observa-se que a utilização de faixas de voo cruzadas atenuou a correlação existente na calibração aérea realizada com fotografias de um voo convencional. A minimização de correlação entre POI e POE em uma calibração aérea é importante, principalmente quando a calibração é realizada na determinação de POI para utilização em outros trabalhos fotogramétricos sem a calibração em serviço. Em outras palavras, a atenuação das correlações entre POI e POE é necessária quando se pretende utilizar os POI para a recuperação da geometria projetiva de fotografias obtidas em outros recobrimentos aéreos (fotografias de épocas e locais diferentes das que foram empregadas no procedimento de calibração). Pois, a dependência entre os parâmetros pode influenciar no cálculo dos POI e, desta forma, a reconstrução do espaço objeto de outro bloco fotogramétrico utilizando destes POI pode ser prejudicada. Entretanto, se a calibração for realizada em serviço a correlação entre os POI e os POE não prejudica a recuperação da geometria projetiva do bloco. Este fato é demonstrado no experimento utilizando fotografias de um voo convencional (CA1), em que as tolerâncias planimétrica e altimétrica foram alcançadas, apesar da existência de correlação na determinação dos parâmetros.

Igualmente como foi empregado no experimento de calibração sem o uso de faixas cruzadas, pontos pré-sinalizados que não participaram do processo de calibração foram utilizados como pontos de verificação. Neste experimento de calibração aérea foram utilizados todos os pontos de verificação do bloco fotogramétrico do campo de calibração, ou seja, os 9 pontos simbolizados como círculos na Figura 22. A Tabela 16 apresenta as médias e EQM das discrepâncias planimétricas e altimétricas resultantes das análises de exatidões realizadas.

TABELA 16 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO COM FAIXAS CRUZADAS

Discrepância Planimétrica		Discrepância Altimétrica	
Média (m)	EQM (m)	Média (m)	EQM (m)
0,078	0,095	0,070	0,216

Na tabela 16 verifica-se que a média das discrepâncias planimétricas e o EQM planimétrico resultantes dessa calibração aérea são similares aos valores obtidos na calibração aérea com voo convencional e ainda, pela Figura 25 que todas as discrepâncias planimétricas são inferiores a um GSD, não apresentando tendência (ver teste t de *Student* no Apêndice 01).

Analisando-se a exatidão altimétrica obtida, verifica-se que as discrepâncias apresentaram valores similares às que foram obtidas na calibração CA1, mas com uma pequena melhora na distribuição das discrepâncias e menor valor de EQM.

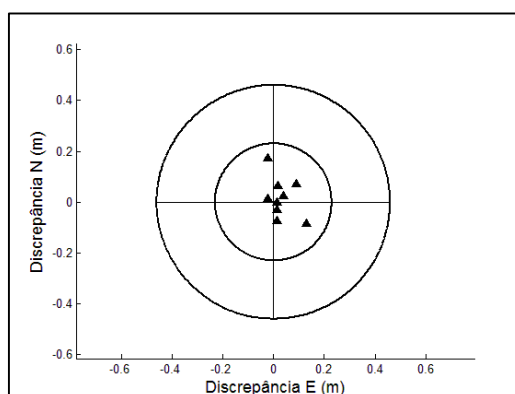


FIGURA 25 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO COM FAIXAS CRUZADAS

O gráfico apresentado na Figura 26 demonstra as discrepâncias altimétrica dos pontos de verificação. Pelo resultado do teste estatístico, apresentado no Apêndice 01, pode-se concluir que estas não apresentaram tendência.

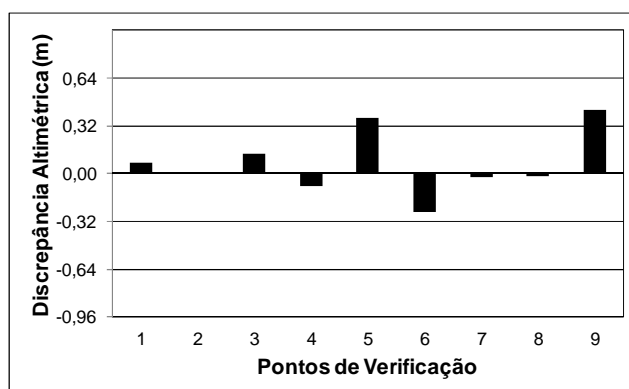


FIGURA 26 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO COM FAIXAS CRUZADAS

Igualmente como realizado na calibração CA1, testes estatísticos foram realizados para verificar se as médias populacionais das discrepâncias planimétricas e altimétricas são iguais ou inferiores aos valores toleráveis de exatidão planimétrica e altimétrica empregados. Os principais resultados obtidos são mostrados na Tabela 17.

TABELA 17 - TESTES DE HIPÓTESE PARA AS EXATIDÕES DA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO COM FAIXAS CRUZADAS

Testes da Exatidão Planimétrica			Testes da Exatidão Altimétrica		
Teste de Normalidade (p valor)	t_{calc}	t_{α}	Teste de Normalidade (p valor)	t_{calc}	t_{α}
0,309	-7,884	1,859	0,072	-9,126	1,859

Observa-se pelos p valores calculados, nos testes de normalidade das discrepâncias, que tanto as planimétricas quanto as altimétricas possuem uma distribuição normal. Pela análise do resultado estatístico do teste t de *Student*, referente à avaliação da exatidão planimétrica obtida, a hipótese H_0 não foi rejeitada, pois o valor calculado para a distribuição t foi menor que o valor tabelado, confirmando que o experimento alcançou a exatidão esperada. Dessa forma, a média populacional das discrepâncias planimétricas resultantes da calibração aérea pode ser considerada estatisticamente inferior ou igual a 0,23 m. Com base no resultado do teste paramétrico t de *Student*, realizado para verificar se a média populacional das discrepâncias altimétrica é igual ou inferior ao valor da exatidão altimétrica esperada, pode-se afirmar que a mesma foi considerada estatisticamente igual ou inferior a 0,64 m.

Com base nas análises realizadas é possível concluir que a utilização de faixas cruzadas acrescentou maior rigidez geométrica ao processo, o que fez com que as correlações entre os parâmetros de orientação das imagens e de posição do PP, existentes no experimento CA1, fossem aqui atenuadas. E ainda, assegurou que os parâmetros de orientação das imagens fossem determinados com exatidões necessárias para permitir a intersecção tridimensional dentro dos padrões de tolerâncias adotados, podendo ser considerado como o melhor procedimento de calibração aérea até aqui analisado.

4.2.3 Calibração aérea utilizando fotografias tomadas com duas alturas de voo

Esta metodologia de calibração aérea teve o objetivo de investigar se o emprego de faixas com diferentes alturas de voo minimiza as correlações entre os POI e POE. O experimento foi realizado utilizando três faixas de voo, sendo duas na altura de 1.000 m e uma na altura de 2.000 m. As faixas possuem sentidos opostos e configuração de voo similar a um recobrimento convencional, mostradas na Figura 22 como sendo as faixas 1, 2 e 5. Para o processamento desta calibração, denominada de CA3, foram empregados os 13 pontos de apoio sinalizados como triângulo e quadrado na Figura 22. Além destes pontos de apoio foram utilizados 96 pontos fotogramétricos de passagem e 7 pontos de verificação. Na Tabela 18 são apresentados os POI e os desvios padrão resultantes deste processamento de calibração aérea.

TABELA 18 - POI DETERMINADOS NA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL COM DUAS ALTURAS DE VOO

	f (mm)	σ_f (mm)	x_0 (mm)	σ_{x_0} (mm)	y_0 (mm)	σ_{y_0} (mm)	k_1 (mm ⁻²)	σ_{k_1} (mm ⁻²)	k_2 (mm ⁻⁴)	σ_{k_2} (mm ⁻⁴)
CA3	34,254	0,003	0,069	0,002	0,261	0,006	-9,221E-05	7,272E-07	1,058E-07	1,791E-09

Analisando-se os valores de POI obtidos nessa calibração, verifica-se que os parâmetros possuem valores similares aos obtidos nas calibrações aéreas já realizadas (CA1 e CA2). Se comparadas as três distâncias focais obtidas nas calibrações aéreas realizadas, verifica-se uma maior variação (~0,007 mm) nessa calibração, mas ainda pequena (~ 1 pixel). Esta variação pode ser considerada como prevista, uma vez que foi utilizada uma faixa com maior altura de voo e, nesse

caso, a influência de outros índices de refração atmosférica no trajeto do raio de luz pode ter ocasionado maior alteração da distância focal. Os valores de correlações entre os parâmetros de distorção radial simétrica com a distância focal, mostrados na Tabela 20, podem justificar a hipótese apresentada anteriormente, pois verifica-se que os valores de k_1 e k_2 são praticamente iguais nas três calibrações realizadas. Por outro lado, como já mencionado, a variação da distância focal pode também estar relacionada com as imprecisões nas coordenadas do CP (Z_0), uma vez que outros valores de coordenadas de CP, com altura média de voo diferente, foram utilizados no processo.

Outra característica importante verificada nessa calibração está relacionada com o valor da coordenada y_0 do PP. Verifica-se aqui que o valor determinado aproxima-se mais do valor obtido pela calibração aérea com o uso de fotografias de um voo convencional com somente uma altura de voo (CA1). Analisando-se o coeficiente de correlação desse parâmetro com o ângulo de rotação ω na Tabela 21 verifica-se que este valor é semelhante ao obtido na calibração CA1. Essa correlação ocasionou menor precisão na determinação do parâmetro y_0 (0,006 mm), como visto em CA1. Este resultado mostra que a utilização de faixas com diferentes alturas de voo não melhora a rigidez geométrica que foi obtida com somente uma altura de voo e configuração de bloco com recobrimento convencional.

Pela Tabela 19 pode-se verificar pelo teste global realizado que os resultados obtidos no ajustamento da calibração encontram-se dentro das precisões admitidas no processo. Os EQM dos resíduos dos pontos de apoio, das coordenadas do CP e das fotocoordenadas corroboram com o resultado do teste global realizado.

TABELA 19 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL COM DUAS ALTURAS DE VOO

EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio e CPs					
EQM X (m)	EQM Y (m)	EQM Z (m)	EQM X_0 (m)	EQM Y_0 (m)	EQM Z_0 (m)
0,007	0,010	0,003	0,036	0,023	0,071
EQM dos resíduos das fotocoordenadas e Teste Global					
EQM x (mm)	EQM y (mm)	gl	$\hat{\sigma}_0^2$	χ_a^2	$\chi_{(gl, 1-\alpha)}^2$
0,003	0,003	856	0,847	725,118	925,176

Observa-se pela matriz de correlação dos POI, apresentada na Tabela 20, que assim como nas calibrações realizadas anteriormente, os parâmetros k_1 e k_2 são

os que possuem a mais elevada correlação, o que foi considerado como sendo normal nessa pesquisa.

TABELA 20 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL COM DUAS ALTURAS DE VOO

Matriz de Correlação dos POI					
	f	x_0	y_0	k_1	k_2
f	1,000				
x_0	0,023	1,000			
y_0	0,143	-0,004	1,000		
k_1	-0,774	-0,008	0,064	1,000	
k_2	0,687	0,005	-0,119	-0,969	1,000

A Tabela 21 apresenta os valores médios em módulo das correlações entre POI e POE determinados na calibração aérea com fotografias de um voo convencional tomadas a duas alturas de voo. Como já discutido, verifica-se que, apesar da utilização de fotografias com duas alturas de voo, a correlação entre os POE e POI não foi atenuada. Assim como ocorreu com a calibração realizada com fotografias de um voo convencional tomadas com uma altura de voo, experimento CA1, os parâmetros ω e y_0 apresentaram alta correlação. Com isso, erros em y_0 são absorvidos em ω e terão impacto dependendo da altura de voo. Desta forma, conclui-se que a utilização de diferentes alturas de voo não minimizou as correlações entre estes parâmetros.

TABELA 21 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE DETERMINADOS NA CA COM FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL COM DUAS ALTURAS DE VOO

Correlação entre POI e POE					
	f	x_0	y_0	k_1	k_2
ω	0,126	0,082	0,888	0,059	0,109
φ	0,047	0,537	0,426	0,035	0,056
κ	0,016	0,025	0,059	0,015	0,016
X_0	0,008	0,059	0,011	0,009	0,010
Y_0	0,005	0,017	0,021	0,005	0,006
Z_0	0,049	0,042	0,035	0,022	0,023

Para a verificação da exatidão deste experimento de calibração foram utilizados 7 pontos de verificação, simbolizados como círculo nas faixas 1, 2 e 5 da Figura 22. A Tabela 22 apresenta a média e EQM das discrepâncias planimétricas e altimétricas resultantes do processamento de calibração.

TABELA 22 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CA COM FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL E DUAS ALTURAS DE VOO

Discrepância Planimétrica		Discrepância Altimétrica	
Média (m)	EQM (m)	Média (m)	EQM (m)
0,100	0,112	-0,052	0,214

Com base nos resultados da Tabela 22, observa-se que os EQM resultantes deste processamento são próximos daqueles resultantes do experimento de calibração que utilizou fotografias de um voo convencional com uma altura de voo (CA1), havendo neste caso, uma pequena perda na exatidão planimétrica. Esta pequena alteração na exatidão planimétrica pode ser decorrente da dificuldade de medida do centro dos alvos nas imagens tomadas a 2.000 m, pois a dimensão destes foi planejada para a perfeita visualização nas fotografias tomadas a 1.000 m.

A Figura 27 apresenta a distribuição das discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação utilizados. Verifica-se que todas as discrepâncias são inferiores a um GSD. O teste estatístico apresentado no Apêndice 01 demonstra que as discrepâncias planimétricas não apresentaram tendência.

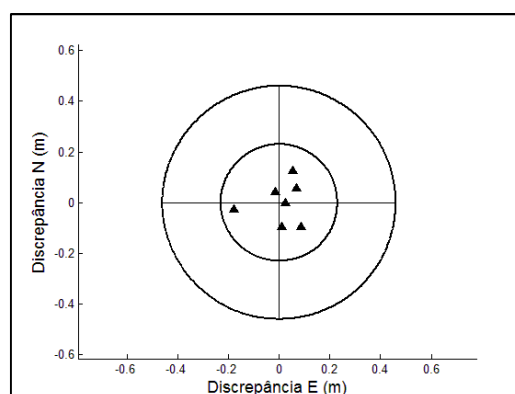


FIGURA 27 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL E DUAS ALTURAS DE VOO

Pela análise da Figura 28 e do resultado do teste de tendência apresentado no Apêndice 01 pode-se observar que as discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação deste experimento não possuem tendência e que a exatidão obtida foi superior à tolerada.

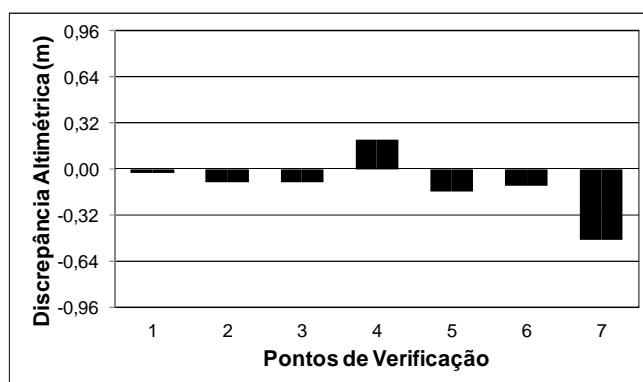


FIGURA 28 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL E DUAS ALTURAS DE VOO

Os resultados dos testes estatísticos para avaliar as exatidões planimétrica e altimétrica obtidas na calibração são aqui também realizados, os principais resultados são apresentados na Tabela 23. Pelos p valores dos testes de normalidade as discrepâncias planimétricas e altimétricas dos pontos de verificação podem ser consideradas como provenientes de uma distribuição normal. Também pode-se afirmar, com 95% de confiança, que a média populacional das discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação é igual ou inferior ao valor de exatidão planimétrica tolerável de 0,23 m. Observa-se ainda que a média populacional das discrepâncias altimétricas pode ser considerada inferior a 0,64 m em um nível de confiança de 95%, ou seja, a exatidão altimétrica esperada também pôde ser alcançada.

TABELA 23 - TESTES DE HIPÓTESE PARA AS EXATIDÕES DA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO CONVENCIONAL E DUAS ALTURAS DE VOO

Testes da Exatidão Planimétrica			Testes da Exatidão Altimétrica		
Teste de Normalidade (p valor)	t_{calc}	t_{α}	Teste de Normalidade (p valor)	t_{calc}	t_{α}
0,921	-6,401	1,943	0,103	-8,443	1,943

Pelas análises dos resultados obtidos nessa calibração aérea pode-se concluir que a mesma não viabiliza um incremento de condições geométricas acima do que foi obtido com a calibração CA1 no que se refere à minimização de correlações entre POE e POI.

4.2.4 Calibração com fotografias com duas alturas de voo e faixas cruzadas

Apesar de ser verificado que a utilização de faixas com diferentes alturas de voo não melhora a configuração geométrica do bloco, a metodologia de calibração com o emprego de faixas cruzadas em duas alturas de voo foi realizada com o propósito de avaliar possíveis modificações dos POI. Neste experimento, denominado de CA4, foram utilizadas todas as faixas que compõem o bloco fotogramétrico do campo de prova de Ponta Grossa, sendo quatro faixas com altura de voo de 1.000 m e duas faixas com altura de voo de 2.000 m. No processamento todos os 24 pontos, sinalizados como triângulo e quadrado na Figura 22, foram utilizados como pontos de apoio. Além destes pontos de apoio foram planejados 154 pontos fotogramétricos de passagem e 9 pontos de verificação. Na Tabela 24 são apresentados os POI determinados pelo processamento da calibração aérea com a configuração de bloco fotogramétrico apresentada.

TABELA 24 - POI DETERMINADOS NA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO COM DUAS ALTURAS DE VOO E FAIXAS CRUZADAS

	f (mm)	σ_f (mm)	x_0 (mm)	σx_0 (mm)	y_0 (mm)	σy_0 (mm)	k_1 (mm ⁻²)	σk_1 (mm ⁻²)	k_2 (mm ⁻⁴)	σk_2 (mm ⁻⁴)
CA4	34,253	0,002	0,068	0,002	0,269	0,003	-9,186E-05	5,179E-07	1,051E-07	1,266E-09

Como era esperado, com exceção do valor da coordenada y_0 do PP, os valores determinados para os outros POI aproximam-se dos que foram obtidos na calibração com o uso de faixas com duas alturas de voo e recobrimento convencional (CA3). O valor do parâmetro y_0 , também esperado, aproxima-se do que foi obtido na calibração com faixas cruzadas numa única altura de voo (CA2). Como já discutido no experimento CA2, a minimização da correlação entre os parâmetros y_0 e ω com o uso de faixas cruzadas, acarretou melhor determinação do parâmetro y_0 . Como pode ser visto na Tabela 27, a utilização de faixas cruzadas em duas alturas de voo não modificou consideravelmente o coeficiente de correlação se comparado com o valor obtido na calibração CA2. Este resultado mostra que o uso de faixas cruzadas com diferentes alturas de voo não melhorou o desempenho da calibração.

O valor obtido para a distância focal aproxima-se muito do valor determinado com a calibração CA3. As hipóteses de variabilidade desse parâmetro com relação

aos que foram determinados nas calibrações com o uso de faixas na altura de voo de 1.000 m, são aqui similares às que foram discutidas na calibração CA3.

Observa-se pelo resultado do teste global, apresentado na Tabela 25, que os resultados obtidos no ajustamento da calibração realizada podem ser aceitos a um nível de confiança de 95%. Este resultado é confirmado pela análise dos EQM dos resíduos das fotocoordenadas, dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio e dos resíduos das coordenadas do CP. Todos possuem valores inferiores às precisões pré-estabelecidas.

TABELA 25 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS DE UM VOO COM DUAS ALTURAS DE VOO E FAIXAS CRUZADAS

EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio e CPs					
EQM X (m)	EQM Y (m)	EQM Z (m)	EQM X ₀ (m)	EQM Y ₀ (m)	EQM Z ₀ (m)
0,008	0,008	0,004	0,032	0,032	0,071
EQM dos resíduos das fotocoordenadas e Teste Global					
EQM x (mm)	EQM y (mm)	gl	$\hat{\sigma}_0^2$	χ_a^2	$\chi_{(gl, 1-\alpha)}^2$
0,003	0,003	1660	0,839	1394,234	1755,900

A Tabela 26 apresenta a matriz de correlação dos POI determinados no processamento da calibração. Como visto nas outras calibrações aéreas realizadas, as correlações entre os POI não sofreram alterações significativas. As mesmas considerações feitas sobre as correlações existentes são aqui também admitidas.

TABELA 26 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CA UTILIZANDO FOTOGRAFIAS COM DUAS ALTURAS DE VOO E FAIXAS CRUZADAS

Matriz de Correlação dos POI					
	f	x ₀	y ₀	k ₁	k ₂
f	1,000				
x ₀	-0,015	1,000			
y ₀	0,053	0,017	1,000		
k ₁	-0,798	0,035	0,035	1,000	
k ₂	0,718	-0,050	-0,074	-0,971	1,000

A Tabela 27 apresenta a média em módulo das correlações entre os POI e POE determinados no experimento de calibração realizado. Como já discutido, o uso de faixas cruzadas com altura de 2.000 m não alterou significativamente os coeficientes de correlação médios absolutos entre os POI e POE determinados no procedimento.

TABELA 27 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE NA CA COM FOTOGRAFIAS DE DUAS ALTURAS DE VOO E FAIXAS CRUZADAS

Correlação entre POI e POE					
	f	x_0	y_0	k_1	k_2
ω	0,029	0,286	0,499	0,023	0,041
φ	0,031	0,280	0,515	0,021	0,036
κ	0,011	0,022	0,037	0,011	0,012
X_0	0,005	0,028	0,013	0,006	0,006
Y_0	0,005	0,025	0,015	0,005	0,007
Z_0	0,036	0,030	0,027	0,019	0,022

A Tabela 28 apresenta as médias e os EQM das discrepâncias planimétrica e altimétrica obtidas nos 9 pontos utilizados como verificação do processamento de calibração aérea.

TABELA 28 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CA COM FOTOGRAFIAS DE DIFERENTES ALTURAS DE VOO E FAIXAS CRUZADAS

Discrepância Planimétrica		Discrepância Altimétrica	
Média (m)	EQM (m)	Média (m)	EQM (m)
0,094	0,108	0,074	0,250

Analisando-se as discrepâncias planimétricas apresentadas na Figura 29 e o resultado do teste t de *Student* (Apêndice 01) é possível verificar que não existe uma tendência na distribuição e que estes valores são todos inferiores a um GSD das fotografias tomadas a 1.000 m de altura.

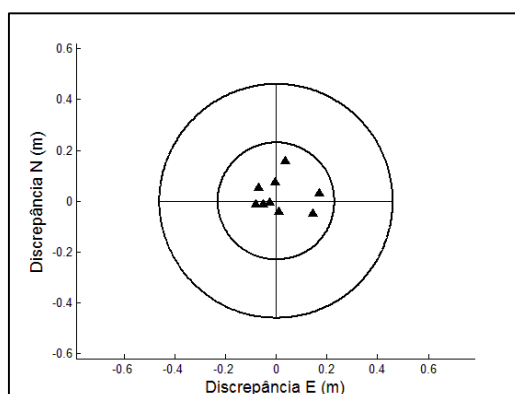


FIGURA 29 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CA COM FOTOGRAFIAS DE UM VOO COM DUAS ALTURAS E FAIXAS CRUZADAS

Pela Figura 30 verifica-se que as discrepâncias altimétricas são inferiores ao valor tolerável de 0,64 m e que as mesmas não apresentaram tendência (Apêndice 01).

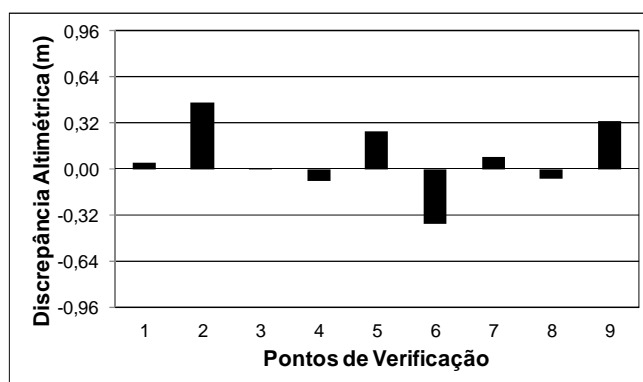


FIGURA 30 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CA COM FOTOGRAFIAS DE UM VOO COM DUAS ALTURAS E FAIXAS CRUZADAS

Igualmente como nas demais calibrações aéreas, testes estatísticos foram realizados para validar os resultados obtidos por meio das análises realizadas com base nas representações gráficas e valores das médias e EQM. Os principais resultados destes testes são apresentados na Tabela 29. Os testes de normalidade aplicados com as discrepâncias planimétrica e altimétrica demonstram que estas possuem uma distribuição normal, pois os p valores determinados nos testes são superiores a 0,05. Os resultados obtidos com o teste paramétrico t de *Student* permitem afirmar com 95% de confiança que as exatidões planimétrica e altimétrica obtidas na calibração são superiores às exatidões admitidas como toleráveis nessa pesquisa.

TABELA 29 - TESTES DE HIPÓTESE PARA AS EXATIDÕES DA CA COM FOTOGRAFIAS DE DUAS ALTURAS DE VOO E FAIXAS CRUZADAS

Testes da Exatidão Planimétrica			Testes da Exatidão Altimétrica		
Teste de Normalidade (p valor)	t_{calc}	t_{α}	Teste de Normalidade (p valor)	t_{calc}	t_{α}
0,199	-7,432	1,859	0,149	-7,907	1,859

4.2.5 Síntese dos resultados das Calibrações Aéreas

Apresenta-se nessa seção as principais conclusões sobre as calibrações aéreas realizadas. Os resultados da calibração terrestre são incluídos, simplesmente para fins de comparação. Na Tabela 30 são agrupados os POI determinados com a calibração terrestre e com as diferentes metodologias de calibração aérea até aqui realizadas. Nas Figuras 31 e 32 apresentam-se gráficos que mostram as posições

do PP no referencial da imagem e as curvas de distorção radial simétrica, elaborados com base nos resultados obtidos nas calibrações aéreas e terrestre.

TABELA 30 - POI DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO TERRESTRE E NAS CALIBRAÇÕES AÉREAS

	f (mm)	σf (mm)	x_0 (mm)	σx_0 (mm)	y_0 (mm)	σy_0 (mm)	k_1 (mm ⁻²)	σk_1 (mm ⁻²)	k_2 (mm ⁻⁴)	σk_2 (mm ⁻⁴)
CT	34,145	0,020	0,089	0,008	0,217	0,008	-9,413E-05	1,542E-06	1,091E-07	4,326E-09
CA1	34,246	0,002	0,067	0,002	0,262	0,005	-9,101E-05	5,639E-07	1,043E-07	1,342E-09
CA2	34,248	0,001	0,064	0,001	0,272	0,002	-9,121E-05	3,677E-07	1,044E-07	8,779E-10
CA3	34,254	0,003	0,069	0,002	0,261	0,006	-9,221E-05	7,272E-07	1,058E-07	1,791E-09
CA4	34,253	0,002	0,068	0,002	0,269	0,003	-9,186E-05	5,179E-07	1,051E-07	1,266E-09

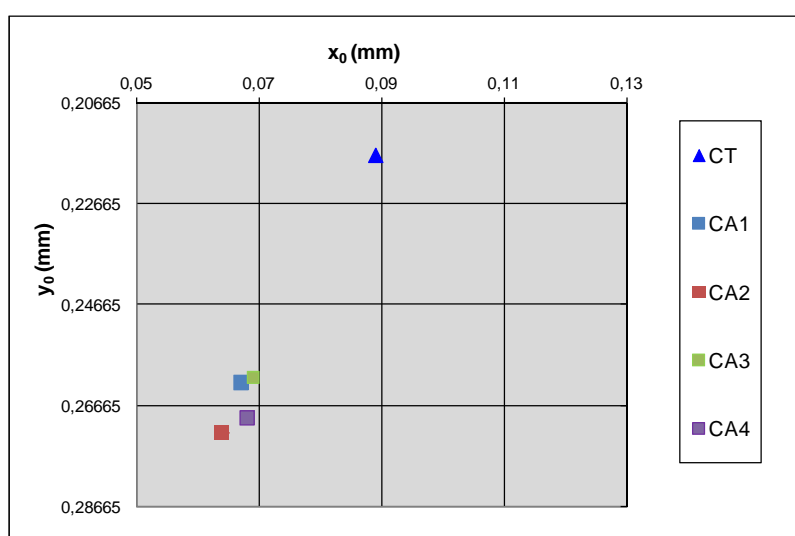


FIGURA 31 - POSIÇÃO DO PP DETERMINADA NA CALIBRAÇÃO TERRESTRE E NAS CALIBRAÇÕES AÉREAS

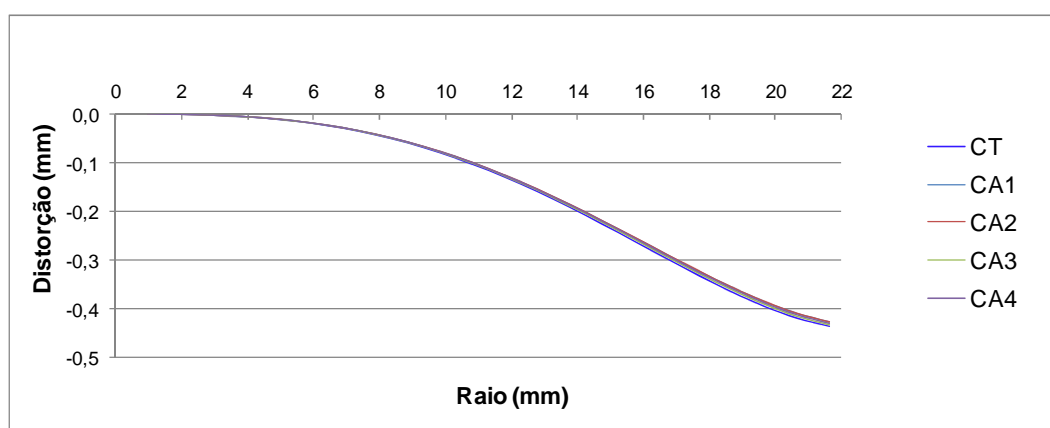


FIGURA 32 - CURVAS DA DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA DA CT E DAS CALIBRAÇÕES AÉREAS

Analisando-se o conjunto de POI determinados nas cinco calibrações verifica-se que os valores de distorção radial simétrica da câmara são praticamente

iguais, tanto na calibração terrestre como em qualquer outra metodologia de calibração aérea experimentada. Conforme Jacobsen (2003), quando a câmara é exposta a variações climáticas e movimentos excessivos, os efeitos de distorção das lentes apresentam-se mais estáveis ao longo do tempo do que a distância focal e as coordenadas do PP. Se forem comparados os parâmetros relacionados com a distância focal e as coordenadas do PP determinados na calibração terrestre com os determinados nas calibrações aéreas, pode-se considerar que as quatro calibrações aéreas apresentam resultados de POI similares. Se não forem consideradas as correlações entre a distância focal e os parâmetros de distorção radial simétrica, presentes em todas as calibrações aéreas, seria possível afirmar que as diferenças entre f , x_0 e y_0 terrestre com os aéreos são decorrentes de imprecisões nas posições dos CP. Entretanto, como existem correlações entre f com k_1 e k_2 , a hipótese das diferenças serem ocasionadas pela refração fotogramétrica não pode ser totalmente descartada, uma vez que esta não foi modelada nas calibrações aéreas. Apesar da pequena magnitude da refração fotogramétrica causada pela atmosfera, Andrade (2003) apresenta a componente da refração referente a camada de ar perturbado pelo movimento da aeronave. Esta camada de ar, em virtude da mudança de velocidade, sofre variação de densidade e, portanto, no índice de refração, causando uma refração fotogramétrica negativa e cerca de 10 vezes maior em módulo que a componente causada pela atmosfera.

Por outro lado, ao se analisar somente as calibrações aéreas, verifica-se com base nos valores determinados da distância focal, dois grupos: calibração com somente uma altura de voo e o segundo com duas alturas de voo. Ou melhor, ao utilizar fotografias com altura de voo de 2.000 m a distância focal variou, aproximadamente, 1 pixel daquelas obtidas com somente fotografias na altura de voo de 1.000 m. Com base no que foi apresentado e se for considerada a inexistência de imprecisões na coordenada Z_0 do CP, as calibrações aéreas com somente uma altura de voo deveriam apresentar menor variação das distâncias focais com a que foi obtida na calibração terrestre. Mas o que se verifica é uma variação de aproximadamente 12,5 pixels. Este resultado permite concluir que as imprecisões na coordenada Z_0 do CP foi o que mais contribuiu com a variação das distâncias focais determinadas nas calibrações aéreas quando comparadas com a determinada na calibração terrestre. Pode-se ainda mencionar como possíveis

causas das variações entre os POI as mudanças mecânicas causadas pela vibração da aeronave e dilatação causada pela variação de temperatura.

As diferenças das posições do PP, entre calibrações aéreas e terrestre, estão, certamente, relacionadas com as imprecisões nas coordenadas X_0 e Y_0 dos CP, uma vez que essas coordenadas foram injuncionadas nas calibrações aéreas e são altamente correlacionadas com a posição do PP.

Com base nas análises realizadas dos resultados obtidos das metodologias de calibração aérea até aqui experimentadas foi possível concluir que a utilização de faixas cruzadas, independente de serem utilizadas faixas com altura de voo diferente, permite minimizar as correlações entre POI e POE que foram considerados livres no ajustamento. A utilização de somente recobrimento convencional e faixas com alturas de voo diferentes não melhorou a minimização da correlação entre y_0 e ω , verificada nos experimentos de calibração sem a utilização de faixas cruzadas.

Na Figura 33 os EQM planimétrico e altimétrico das calibrações aéreas foram agrupados para uma análise do conjunto das exatidões obtidas. Admitindo-se o caso de uma calibração em serviço do sistema de imageamento LACTEC empregando as configurações de recobrimento aéreo propostas, ponto de apoio sinalizados e coordenadas dos CP injuncionadas, a metodologia de calibração com recobrimento convencional e uma altura de voo (CA1) foi a que apresentou o melhor desempenho se for considerado somente os valores obtidos de EQM planimétrico e altimétrico (Figura 33). Entretanto, se forem consideradas as exatidões planimétrica e altimétrica toleráveis, pode-se concluir que as calibrações aéreas apresentaram exatidões similares.

As análises de compatibilização dos POI para a realização de trabalhos fotogramétricos independentes do ambiente da calibração são realizados na seção 4.6 deste trabalho. Os POI obtidos nas 5 calibrações são empregados para a correção dos erros sistemáticos nas observações realizadas em fotografias de outro bloco fotogramétrico, visando o processamento e análises de exatidões planiatimétricas obtidas.

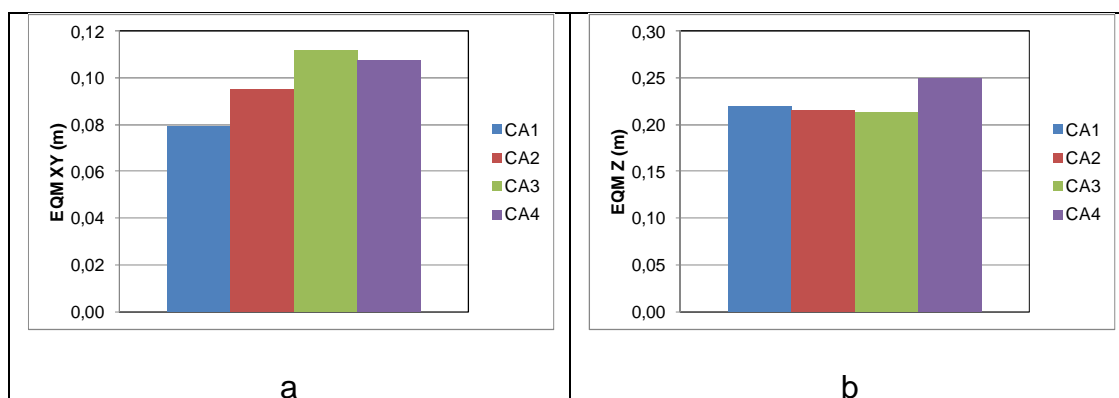


FIGURA 33 - a) EQM PLANIMÉTRICO DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO b) EQM ALTIMÉTRICO DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DAS CALIBRAÇÕES AÉREAS

4.3 VERIFICAÇÃO DA VIABILIDADE DA CALIBRAÇÃO AÉREA COM NÚMERO MÍNIMO DE PONTOS DE APOIO

Os experimentos apresentados nesta seção têm como finalidade obter dados para validar a calibração em serviço, baseando-se na exatidão obtida com a calibração aérea quando se utiliza um número mínimo de pontos de apoio pré-sinalizados do campo de prova. Os experimentos utilizaram o bloco fotogramétrico composto por duas faixas de voo, ou seja, foram utilizadas fotografias de um voo convencional (faixas 1 e 2 da Figura 22).

4.3.1 Calibração Aérea utilizando 1 ponto de apoio planialtimétrico

Este experimento tem por objetivo a obtenção de resultados para validar as metodologias de calibração em serviço. A calibração aérea, com injeção nas coordenadas do CP da câmara, foi realizada com um bloco de recobrimento convencional (faixas 1 e 2 do campo de prova) e 1 ponto de apoio pré-sinalizado localizado no centro do bloco (ponto sinalizado com um quadrado na Figura 22). Além do ponto de apoio foram utilizados 108 pontos fotogramétricos de passagem e 7 pontos de verificação. A Tabela 31 apresenta os POI determinados neste experimento, denominado de CA5.

TABELA 31 - POI DETERMINADOS NA CA COM UM PONTO DE APOIO

	f	σ_f	x_0	σx_0	y_0	σy_0	k_1	σk_1	k_2	σk_2
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm ⁻²)	(mm ⁻²)	(mm ⁻⁴)	(mm ⁻⁴)
CA5	34,238	0,006	0,068	0,002	0,261	0,006	-9,093E-05	5,771E-07	1,038E-07	1,369E-09

Os valores determinados para os POI nesta calibração são muito similares aos que foram obtidos na calibração com a mesma configuração de fotografias mas com um número maior de pontos de apoio (CA1). Embora a distância focal determinada neste experimento, seja o parâmetro que apresentou maior variabilidade em relação a calibração CA1, a variação de 0,008 mm (1 pixel) não foi considerada significativa. As coordenadas do PP não apresentaram variação maior que suas precisões em relação ao experimento de calibração utilizando maior número de pontos de apoio. Os parâmetros de distorção radial simétrica também não apresentaram variações significativas em relação aos parâmetros determinados em CA1. Na Tabela 32 são apresentados os EQM resultantes do ajustamento e o resultado do teste global. Verifica-se que, segundo o resultado do teste global, o ajustamento da calibração pode ser estatisticamente aceito.

TABELA 32 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CA COM UM PONTO DE APOIO

EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio e CPs					
EQM X (m)	EQM Y (m)	EQM Z (m)	EQM X_0 (m)	EQM Y_0 (m)	EQM Z_0 (m)
0,018	0,001	0,001	0,055	0,047	0,081
EQM dos resíduos das fotocoordenadas e Teste Global					
EQM x (mm)	EQM y (mm)	gl	$\hat{\sigma}_0^2$	χ_a^2	$\chi_{(gl, 1-\alpha)}^2$
0,001	0,002	413	0,297	122,578	461,383

Na Tabela 33 é apresentada a matriz de correlação entre os POI determinados. Assim como em todas as calibrações aéreas realizadas, os parâmetros k_1 e k_2 apresentaram forte correlação e, como já mencionado, esta correlação é considerada como sendo normal. Diferentemente do que foi verificado em todas as calibrações aéreas discutidas até aqui, neste experimento a correlação entre a distância focal e os parâmetros de distorção radial simétrica foi pequena. Resultado esse não esperado, pois como realizado nos outros experimentos, as coordenadas Z_0 dos CP foram aqui também injuncionadas. Comparando-se com a calibração CA3 que apresentou variação aproximadamente igual na distância focal, de valor próximo a 1 pixel para mais (em relação a CA1), nessa calibração a diferença ocorreu para menos. Apesar de diferenças entre as distâncias focais nos experimentos (uma para mais e outra para menos) verifica-se que não houve diferenças acentuadas quanto à exatidão altimétrica. A exatidão planimétrica foi

menor, conforme mostrado na Tabela 35 e Figura 34. Resultado esse que mostra que a utilização de somente um ponto de apoio não viabiliza exatidão planimétrica compatível com as calibrações realizadas com número maior de pontos de apoio.

TABELA 33 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CA COM UM PONTO DE APOIO

Matriz de Correlação dos POI					
	f	x_0	y_0	k_1	k_2
f	1,000				
x_0	-0,013	1,000			
y_0	-0,095	0,062	1,000		
k_1	-0,239	-0,026	0,050	1,000	
k_2	0,258	0,016	-0,136	-0,968	1,000

Na Tabela 34 são apresentadas as médias em módulo das correlações entre POE e POI determinados na calibração. Assim como nas demais calibrações que utilizaram faixas de voo convencional, observa-se a existência de correlação entre y_0 e ω .

TABELA 34 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE DETERMINADOS NA CA COM UM PONTO DE APOIO

Correlação entre POI e POE					
	f	x_0	y_0	k_1	k_2
ω	0,125	0,240	0,790	0,039	0,110
φ	0,399	0,334	0,379	0,046	0,062
κ	0,071	0,441	0,085	0,018	0,023
X_0	0,024	0,060	0,012	0,011	0,012
Y_0	0,008	0,019	0,019	0,008	0,009
Z_0	0,091	0,105	0,048	0,026	0,026

Para manter a uniformização das análises, os mesmos 7 pontos de verificação, empregados nos outros experimentos de calibração aérea, foram utilizados. A Tabela 35 apresenta as médias e EQM das discrepâncias planimétrica e altimétrica dos pontos de verificação.

TABELA 35 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CA COM UM PONTO DE APOIO

Discrepância Planimétrica		Discrepância Altimétrica	
Média (m)	EQM (m)	Média (m)	EQM (m)
0,225	0,264	-0,138	0,229

Como já mencionado, com a utilização de somente 1 ponto de apoio planialtimétrico, a média das discrepâncias planimétricas aumentou

consideravelmente em relação ao experimento de calibração com a mesma configuração de bloco fotogramétrico e maior número de pontos de apoio. Observa-se pela Figura 34 que dos 7 pontos utilizados como verificação do processamento, em um ponto a discrepância planimétrica foi superior a um GSD (0,23 m) e em outro ponto a discrepância foi superior a dois GSD (0,46 m). Estes pontos de verificação são, justamente, os pontos localizados nos dois extremos do bloco fotogramétrico, ou seja, estes são os pontos mais distantes do ponto de apoio utilizado. Apesar da inexistência de tendência apresentada no teste estatístico realizado (Apêndice 01), este resultado mostra a inviabilidade de utilizar somente um ponto de apoio no centro do bloco, pois mesmo em um pequeno bloco, como o que foi utilizado, os resultados de exatidão planimétrica foram muito inferiores aos obtidos com maior número de pontos de apoio.

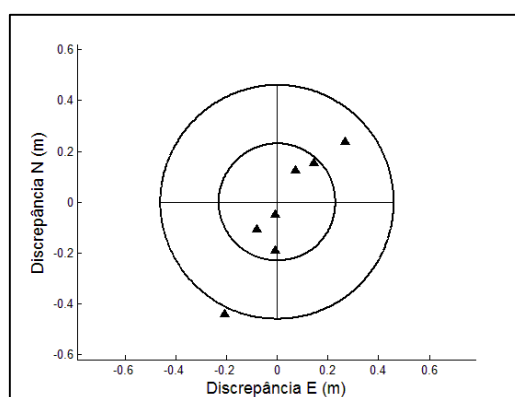


FIGURA 34 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CA COM UM PONTO DE APOIO

Como pode ser visto na Figura 35 e Apêndice 01, as discrepâncias altimétricas não possuem tendência e todos os pontos de verificação apresentaram discrepância inferior ao valor tolerável, ou seja, resultado muito similar ao obtido com a calibração CA1 que empregou 13 pontos de apoio planialtimétrico. Esse resultado pode ser ocasional, pois devido à configuração adotada de somente um ponto de apoio no centro, era de se esperar inexactidões nos extremos do bloco, como ocorrido no caso planimétrico.

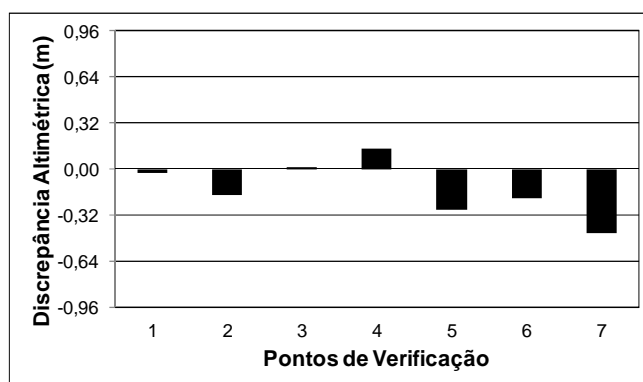


FIGURA 35 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CA COM UM PONTO DE APOIO

Igualmente como nos demais experimentos foram realizados, além das análises fundamentadas pelos gráficos anteriormente apresentados, testes estatísticos para verificar se as médias populacionais das discrepâncias planimétrica e altimétrica são iguais ou inferiores aos valores de exatidão esperados. Os principais resultados obtidos nos testes são apresentados na Tabela 36.

TABELA 36 - TESTES DE HIPÓTESE PARA AS EXATIDÕES PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS DA CA COM UM PONTO DE APOIO

Testes da Exatidão Planimétrica			Testes da Exatidão Altimétrica		
Teste de Normalidade (p valor)	t_{calc}	t_{α}	Teste de Normalidade (p valor)	t_{calc}	t_{α}
0,463	-0,089	1,943	0,969	-10,470	1,943

Os testes de normalidade de *Shapiro-Wilk* realizados permitem afirmar com 95% de confiança que as discrepâncias planimétrica e altimétrica dos pontos de verificação possuem uma distribuição normal, pois os p valores calculados são maiores que 0,05.

Pela análise do teste estatístico realizado com as discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação, a hipótese H_0 não foi rejeitada, pois o valor calculado para a distribuição t foi menor que o valor tabelado. Com esta prerrogativa, pode-se afirmar com 95% de confiança que a média populacional das discrepâncias planimétricas resultantes da calibração aérea pode ser considerada estatisticamente inferior ou igual a 0,23 m.

O resultado do teste paramétrico *t* de *Student*, realizado com as discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação, demonstra que a média populacional destas discrepâncias é igual ou inferior ao valor tolerável de 0,64 m.

Apesar de uma perda considerável de exatidão planimétrica quando comparada com a obtida na calibração com maior número de pontos de apoio (CA1), os resultados dos testes estatísticos, com base na exatidão planimétrica tolerável, demonstraram que a média populacional pode ser considerada igual ou menor que 0,23 m.

4.3.2 Calibração Aérea utilizando 2 pontos de apoio planialtimétrico

Como forma de verificar a quantidade mínima de pontos de apoio planialtimétrico numa calibração em serviço, o experimento foi realizado com 2 pontos de apoio nos extremos do bloco (pontos sinalizados com quadrado na Figura 22). Além dos pontos de apoio foram planejados 107 pontos fotogramétricos de passagem e 7 pontos de verificação. A Tabela 37 apresenta os POI com os desvios padrão resultantes desta calibração aérea, denominada de CA6.

TABELA 37 - POI DETERMINADOS DA CA UTILIZANDO DOIS PONTOS DE APOIO

	f (mm)	σ_f (mm)	x_0 (mm)	σx_0 (mm)	y_0 (mm)	σy_0 (mm)	k_1 (mm ⁻²)	σk_1 (mm ⁻²)	k_2 (mm ⁻⁴)	σk_2 (mm ⁻⁴)
CA6	34,255	0,007	0,067	0,002	0,264	0,006	-9,091E-05	5,852E-07	1,039E-07	1,388E-09

Como já verificado no experimento anterior com somente um ponto de apoio, os POI determinados nesta calibração podem ser considerados similares aos determinados na calibração (CA1). Observa-se que, novamente a distância focal foi o parâmetro que apresentou maior variabilidade (~1 pixel), mas nesse caso, a variação foi para mais, como ocorreu em CA3. Apesar da variabilidade da distância focal para mais, não foram verificadas correlações entre f com k_1 e k_2 (Tabela 39), mostrando que a variabilidade para menos não foi a causa para a inexistência dessas correlações. Entretanto, a menor exatidão planimétrica ainda ocorre de forma similar à encontrada no experimento anterior como mostrada na Tabela 41 e Figura 36.

A Tabela 38 apresenta os EQM e o resultado do teste global do ajustamento da calibração aérea. Pela análise destes dados pode-se considerar os resultados do

ajustamento encontram-se dentro do esperado, uma vez que os EQM dos resíduos das fotocoordenadas, dos resíduos dos pontos de apoio e dos resíduos das coordenadas do CP estão de acordo com as precisões admitidas no processo.

TABELA 38- RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CA COM DOIS PONTOS DE APOIO

EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio e CPs					
EQM X (m)	EQM Y (m)	EQM Z (m)	EQM X ₀ (m)	EQM Y ₀ (m)	EQM Z ₀ (m)
0,009	0,002	0,004	0,053	0,047	0,092
EQM dos resíduos das fotocoordenadas e Teste Global					
EQM x (mm)	EQM y (mm)	gl	$\hat{\sigma}_0^2$	χ_a^2	$\chi_{(gl,1-\alpha)}^2$
0,001	0,002	416	0,305	127,005	464,554

A Tabela 39 apresenta as correlações entre os POI determinados na calibração realizada com dois pontos de apoio. Da mesma forma que em CA5, os parâmetros que apresentaram elevada correlação foram somente os dois coeficientes da distorção radial simétrica. A correlação entre a distância focal e os parâmetros da distorção radial simétrica também não foi verificada.

TABELA 39 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CA COM DOIS PONTOS DE APOIO

Matriz de Correlação dos POI					
	f	x ₀	y ₀	k ₁	k ₂
f	1,000				
x ₀	0,112	1,000			
y ₀	0,073	0,015	1,000		
k ₁	-0,368	-0,035	0,052	1,000	
k ₂	0,300	0,024	-0,141	-0,969	1,000

Na Tabela 40 são apresentadas as médias em módulo das correlações entre POI e POE. Assim como verificado nas outras calibrações aéreas em que foram utilizadas fotografias de um voo convencional, pode-se observar a existência de elevada correlação entre os parâmetros y₀ e ω.

TABELA 40 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE DETERMINADOS NA CA UTILIZANDO DOIS PONTOS DE APOIO

Correlação entre POI e POE					
	f	x ₀	y ₀	k ₁	k ₂
ω	0,127	0,078	0,873	0,045	0,123
φ	0,264	0,398	0,424	0,044	0,069
κ	0,115	0,060	0,055	0,023	0,025
X ₀	0,009	0,071	0,011	0,011	0,012
Y ₀	0,009	0,020	0,020	0,008	0,009
Z ₀	0,046	0,049	0,047	0,025	0,027

Na Tabela 41 são apresentadas as médias e EQM das discrepâncias planimétrica e altimétrica dos 7 pontos utilizados como pontos de verificação deste processamento. Pela análise dos resultados obtidos verifica-se que a exatidão planimétrica foi similar à do experimento anterior, mas com uma pequena melhora, pois neste somente 1 ponto de verificação apresentou discrepância planimétrica superior a 1 GSD. Apesar da melhora na exatidão planimétrica em relação ao experimento CA5, a análise da Figura 36 e o resultado do teste estatístico (apresentado no Apêndice 01) mostraram a existência de uma pequena tendência na direção leste.

A exatidão altimétrica nessa calibração é menor que a obtida no experimento anterior. Na Figura 37 observa-se que somente um ponto de verificação, localizado também no extremo do bloco, apresentou discrepância altimétrica superior ao valor tolerável, contribuindo com o acréscimo do EQM altimétrico em relação ao experimento anterior. De forma geral, a menos desse único ponto, pode-se concluir que as exatidões altimétricas são similares e ainda, se for considerada a exatidão altimétrica tolerável, determinada pela relação base/altura de voo, ambas as exatidões obtidas encontram-se acima do valor tolerável.

TABELA 41 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CA COM DOIS PONTOS DE APOIO

Discrepância Planimétrica		Discrepância Altimétrica	
Média (m)	EQM (m)	Média (m)	EQM (m)
0,199	0,211	0,166	0,392

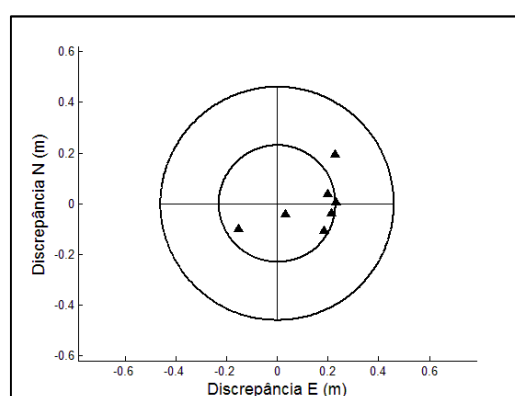


FIGURA 36 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CA UTILIZANDO DOIS PONTOS DE APOIO

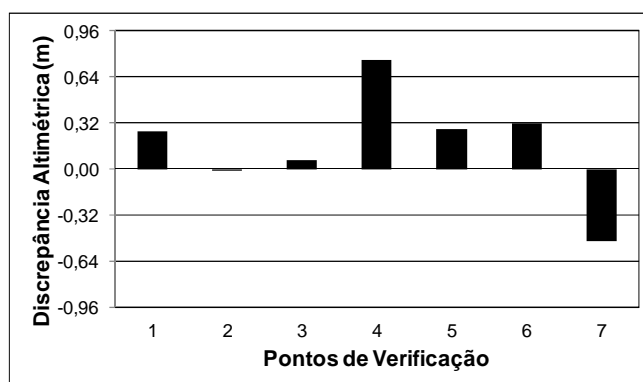


FIGURA 37 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CA UTILIZANDO DOIS PONTOS DE APOIO

Associado às análises dos resultados de verificação da exatidão do experimento de calibração por meio dos gráficos apresentados, foram realizados testes estatísticos. Na Tabela 42 são apresentados os principais resultados obtidos nos testes estatísticos realizados. Os p valores determinados nos testes estatísticos de normalidade demonstram que as discrepâncias planimétricas e altimétricas dos pontos de verificação possuem uma distribuição normal. Através dos testes paramétricos realizados com as discrepâncias planimétricas e altimétricas pode-se afirmar com 95% de confiança que a média populacional destas discrepâncias é igual ou inferior aos valores de exatidão toleráveis.

TABELA 42 - TESTES DE HIPÓTESE PARA AS EXATIDÕES PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS NA CA COM DOIS PONTOS DE APOIO

Testes da Exatidão Planimétrica			Testes da Exatidão Altimétrica		
Teste de Normalidade (p valor)	t_{calc}	t_{α}	Teste de Normalidade (p valor)	t_{calc}	t_{α}
0,190	-1,086	1,943	0,721	-3,267	1,943

Analisando as calibrações aéreas com um ou dois pontos de apoio planialtimétrico e bloco com configuração de voo convencional utilizado nessa pesquisa pode-se concluir que não houve variações significativas na determinação dos POI e as exatidões planimétrica e altimétrica obtidas encontram-se dentro de valores toleráveis.

Experimentos com maior variação de número mínimo de pontos de apoio planialtimétricos não foram apresentados nesse trabalho, pois a inclusão de somente pontos de apoio altimétricos permitiu o incremento das exatidões planialtimétricas

próximas às que foram alcançadas no experimento CA1. Os resultados e discussões destes experimentos são a seguir apresentados.

4.4 VERIFICAÇÃO DA VIABILIDADE DA CALIBRAÇÃO AÉREA UTILIZANDO PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO

Considerando a possibilidade do emprego dos dados provenientes do levantamento LIDAR na calibração em serviço da câmara, os experimentos apresentados nesta seção tiveram como propósito avaliar a viabilidade de realizar o processo empregando pontos de apoio altimétrico. Como o objetivo é calibrar a câmara em serviço, foram utilizadas nos experimentos fotografias de um voo convencional sem faixas cruzadas ou seja, o mesmo bloco empregado nas calibrações CA1, CA5 e CA6.

Neste experimento de calibração, denominado de CA7, foram empregadas as fotografias que compõem as faixas 1 e 2 do campo de prova, os 13 pontos de apoio pré-sinalizados destas fotografias (Figura 22), 7 pontos de verificação e 96 pontos fotogramétricos de passagem. A principal diferença em relação à calibração CA1 foi que nesta, somente as coordenadas altimétricas dos 13 pontos de apoio foram injuncionadas. A precisão adotada para as coordenadas altimétricas dos pontos de apoio foi a mesma precisão do levantamento GNSS (0,03 m).

Na Tabela 43 são apresentados os POI obtidos com a calibração aérea. Comparando-se os valores obtidos verifica-se que estes são muito próximos dos que foram determinados na calibração CA5 (utilizando um ponto de apoio planialtimétrico). Somente a distância focal e a coordenada y_0 do PP variaram em torno de 0,005 mm. Os outros parâmetros são praticamente os mesmos.

TABELA 43 - POI DETERMINADOS DA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O CAMPO DE PROVA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO

	f (mm)	σ_f (mm)	x_0 (mm)	σx_0 (mm)	y_0 (mm)	σy_0 (mm)	k_1 (mm ⁻²)	σk_1 (mm ⁻²)	k_2 (mm ⁻⁴)	σk_2 (mm ⁻⁴)
CA7	34,233	0,003	0,069	0,002	0,266	0,005	-9,090E-05	5,460E-07	1,035E-07	1,304E-09

Pelos resultados do ajustamento da calibração, apresentados na Tabela 44, pode-se concluir que as observações realizadas no ajustamento encontram-se

dentro das precisões admitidas. Verifica-se pelo teste do qui-quadrado realizado que o ajustamento pode ser estatisticamente aceito a um nível de 95 % de confiança.

TABELA 44 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O CAMPO DE PROVA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO

EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio e CPs					
EQM X (m)	EQM Y (m)	EQM Z (m)	EQM X ₀ (m)	EQM Y ₀ (m)	EQM Z ₀ (m)
-	-	0,001	0,027	0,025	0,052
EQM dos resíduos das fotocoordenadas e Teste Global					
EQM x (mm)	EQM y (mm)	gl	$\hat{\sigma}_0^2$	χ_a^2	$\chi_{(gl, 1-\alpha)}^2$
0,001	0,002	423	0,275	116,452	471,952

As correlações entre os POI, apresentadas na Tabela 45 são similares às que foram obtidas na calibração CA5. Entretanto, percebe-se um aumento dos coeficientes de correlação entre f com k₁ e k₂ se comparados com os valores obtidos em CA5.

TABELA 45 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O CAMPO DE PROVA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO

Matriz de Correlação dos POI					
	f	x ₀	y ₀	k ₁	k ₂
f	1,000				
x ₀	0,015	1,000			
y ₀	0,106	0,041	1,000		
k ₁	-0,474	-0,013	0,083	1,000	
k ₂	0,452	0,004	-0,164	-0,969	1,000

Na Tabela 46 são apresentadas as médias em módulo das correlações entre POI e POE. Mesmo não utilizando faixas de voo cruzadas ou faixas de voo com diferentes alturas, observa-se que o coeficiente de correlação entre y₀ e ω é menor em relação às calibrações que empregaram bloco com configuração de voo convencional e pontos de apoio planialtimétrico (CA1, CA3, CA5 e CA6). Considerando que, em todos os experimentos, as orientações das imagens foram assumidas como variáveis no ajustamento, estas sofreram compensações angulares de forma a prover melhor adequação dos raios de luz no espaço objeto, tornando-se mais dependentes com a determinação das coordenadas do PP. Contudo, nesse experimento, em que foram utilizados somente pontos de apoio altimétrico, não foram necessárias grandes compensações angulares para a adequação planimétrica, uma vez que essas foram assumidas como variáveis no ajustamento. Entretanto, apesar de menor coeficiente de correlação pode-se verificar que a

precisão de determinação do parâmetro y_0 (0,006 mm - Tabela 43) ainda não apresentou valores equivalentes aos que foram obtidos nos experimentos com faixas cruzadas (CA2 e CA4).

TABELA 46 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O CAMPO DE PROVA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO

Correlação entre POI e POE					
	f	x_0	y_0	k_1	k_2
ω	0,075	0,205	0,678	0,058	0,116
φ	0,317	0,349	0,354	0,039	0,067
κ	0,039	0,405	0,059	0,014	0,022
X_0	0,036	0,062	0,011	0,012	0,013
Y_0	0,012	0,020	0,021	0,008	0,009
Z_0	0,107	0,090	0,036	0,025	0,026

Na Tabela 47 são apresentadas as médias e EQM das discrepâncias planimétricas e altimétricas dos 7 pontos utilizados como verificação nesta calibração. Observa-se uma degradação da exatidão planimétrica deste processamento quando comparado às calibrações utilizando maior número de pontos de apoio planialtimétrico. A média das discrepâncias, resultantes dos pontos utilizados como verificação nesta calibração, se aproxima do valor que corresponde a dois GSD das fotografias tomadas a 1.000 m. Na Figura 38 e no teste estatístico apresentado no Apêndice 01, pode-se observar uma tendência acentuada das discrepâncias planimétricas no eixo X para a direção leste. Uma das hipóteses que poderiam explicar esta tendência é a imprecisão nas coordenadas do CP da câmara (X_0 e Y_0), que nesse experimento não foram absorvidas pelos parâmetros de orientação das imagens.

TABELA 47 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O CAMPO DE PROVA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO

Discrepância Planimétrica		Discrepância Altimétrica	
Média (m)	EQM (m)	Média (m)	EQM (m)
0,462	0,485	-0,170	0,321

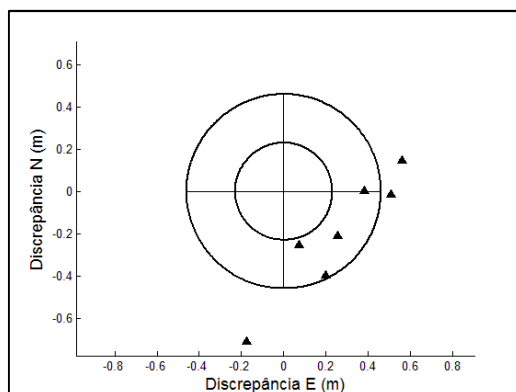


FIGURA 38 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO DO CAMPO DE PROVA

Na Figura 39 são apresentadas as discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação. Como pode ser observado a precisão altimétrica é similar às que foram obtidas na calibração CA5, a menos de um ponto que apresentou discrepância altimétrica superior ao valor tolerado, ponto localizado em um dos extremos do bloco fotogramétrico como ocorrido em CA6. Da mesma forma, se for considerada a exatidão altimétrica tolerável, a exatidão obtida nesta calibração encontra-se dentro do esperado.

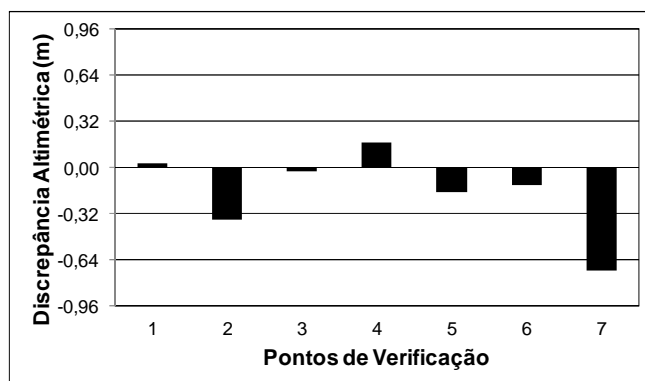


FIGURA 39 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO DO CAMPO DE PROVA

Mesmo com a verificação de tendência acentuada na planimetria dos pontos de verificação foi realizado um teste estatístico para verificar se a média populacional das discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação é igual ou inferior a 1 GSD, ou seja, a 0,23 m. Na Tabela 48 são apresentados os principais resultados dos testes estatísticos realizados para a análise das discrepâncias planimétricas e altimétricas.

TABELA 48 - TESTES DE HIPÓTESE PARA AS EXATIDÕES DA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO DO CAMPO DE PROVA

Testes da Exatidão Planimétrica			Testes da Exatidão Altimétrica		
Teste de Normalidade (p valor)	t_{calc}	t_{α}	Teste de Normalidade (p valor)	t_{calc}	t_{α}
0,926	3,886	1,943	0,057	-4,481	1,943

Verifica-se pelo teste de normalidade realizado com as discrepâncias planimétricas e altimétricas dos pontos de verificação que estas possuem uma distribuição normal. Como já esperado, pela análise do teste t realizado com as discrepâncias planimétricas pode-se afirmar com 95% de confiança que a média populacional dessas discrepâncias não é igual ou inferior a 0,23 m.

O resultado do teste paramétrico realizado com as discrepâncias altimétricas demonstra que a hipótese H_0 não foi rejeitada, ou seja pode-se considerar, com 95% de confiança, a média populacional das discrepâncias altimétricas obtidas neste experimento igual ou inferior a 0,64 m. Conclui-se que, no experimento realizado com a configuração proposta de pontos de apoio altimétrico, somente a exatidão altimétrica tolerada foi alcançada.

O emprego de somente pontos de apoio altimétrico na calibração aérea não resultou em POI significativamente diferentes dos que foram determinados nas demais calibrações aéreas com o uso de um ou mais pontos de apoio planialtimétrico. Entretanto, a exatidão planimétrica foi fortemente alterada, pois a inexistência de apoio planimétrico não proporcionou a correta determinação angular das imagens, inviabilizando a metodologia de calibração em serviço com somente pontos de apoio altimétrico e junções de posição nos CP.

4.4.1 Calibração Aérea com pontos de apoio altimétrico e 1 ponto de apoio planialtimétrico

O experimento de calibração foi realizado com o objetivo de verificar se a inclusão de 1 ponto de apoio planialtimétrico no centro do bloco (ponto sinalizado com um quadrado na Figura 22) pode resolver o problema de tendência observada na planimetria da calibração CA7. Realizou-se um experimento utilizando 12 pontos de apoio altimétrico e um planialtimétrico. Além dos pontos de apoio foram utilizados

96 pontos fotogramétricos de passagem e 7 pontos de verificação. Os POI determinados nesta calibração (CA8) são apresentados na Tabela 49. Observa-se que os POI são praticamente iguais aos que foram obtidos na calibração com somente um ponto de apoio planialtimétrico (CA5).

TABELA 49 - POI DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O CAMPO DE PROVA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO E 01 APOIO PLANIALTIMÉTRICO

	f (mm)	σ_f (mm)	x_0 (mm)	σx_0 (mm)	y_0 (mm)	σy_0 (mm)	k_1 (mm ⁻²)	σk_1 (mm ⁻²)	k_2 (mm ⁻⁴)	σk_2 (mm ⁻⁴)
CA8	34,237	0,003	0,068	0,002	0,263	0,005	-9,093E-05	5,629E-07	1,039E-07	1,343E-09

A Tabela 50 apresenta os EQM provenientes do ajustamento da calibração e o resultado do teste global realizado. Pelo resultado apresentado do teste do qui-quadrado pode-se aceitar estatisticamente os resultados obtidos no ajustamento da calibração. Verifica-se que os EQM dos resíduos das fotocoordenadas, dos pontos de apoio e das coordenadas do CP estão de acordo com as precisões admitidas para o processo.

TABELA 50 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O CAMPO DE PROVA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO E 01 APOIO PLANIALTIMÉTRICO

EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio e CPs					
EQM X (m)	EQM Y (m)	EQM Z (m)	EQM X ₀ (m)	EQM Y ₀ (m)	EQM Z ₀ (m)
0,019	0,001	0,001	0,034	0,025	0,056
EQM dos resíduos das fotocoordenadas e Teste Global					
EQM x (mm)	EQM y (mm)	gl	$\hat{\sigma}_0^2$	χ_a^2	$\chi_{(gl, 1-\alpha)}^2$
0,001	0,002	425	0,293	124,567	474,065

A inclusão de um ponto de apoio planialtimétrico no bloco não alterou o comportamento dos coeficientes de correlação entre os POI, pois esses valores são similares aos que foram obtidas na calibração CA7, como pode ser observado na Tabela 51. Por outro lado, verifica-se na Tabela 52 que o coeficiente de correlação entre y_0 e ω sofreu um pequeno acréscimo, mostrando que a utilização de injunção na planimetria de somente 1 ponto no terreno exigiu maior adequação das orientações para atendimento da posição injuncionada e assim, a determinação do y_0 ficou mais dependente do movimento angular ω .

TABELA 51 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O CAMPO DE PROVA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO E 01 APOIO PLANIALTIMÉTRICO

Matriz de Correlação dos POI					
	f	x ₀	y ₀	k ₁	k ₂
f	1,000				
x ₀	0,033	1,000			
y ₀	0,123	0,042	1,000		
k ₁	-0,485	-0,011	0,078	1,000	
k ₂	0,451	0,008	-0,159	-0,971	1,000

TABELA 52 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O CAMPO DE PROVA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO E 01 APOIO PLANIALTIMÉTRICO

Correlação entre POI e POE					
	f	x ₀	y ₀	k ₁	k ₂
ω	0,075	0,223	0,777	0,065	0,129
φ	0,338	0,387	0,389	0,041	0,071
κ	0,023	0,402	0,076	0,014	0,024
X ₀	0,035	0,063	0,013	0,012	0,013
Y ₀	0,011	0,020	0,022	0,008	0,009
Z ₀	0,104	0,088	0,041	0,026	0,028

A Tabela 53 apresenta as médias e EQM das discrepâncias planimétricas e altimétricas determinadas com os 7 pontos de verificação utilizados. Pode-se observar que a adição de 1 ponto de apoio planimétrico reduziu a média das discrepâncias planimétricas pela metade, se comparada com a que foi obtida no experimento anterior. Analisando-se a Figura 40 e o teste estatístico no Apêndice 01 verifica-se que a inserção de 1 ponto de apoio planialtimétrico melhorou a distribuição planimétrica e minimizou a tendência, ficando praticamente igual à que foi obtida com a calibração com somente um ponto de apoio planialtimétrico. Se for considerada a configuração do bloco com somente um ponto de apoio planialtimétrico (CA5), a inserção de pontos de apoio altimétrico não apresentou vantagens significativas.

TABELA 53 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CALIBRAÇÃO AÉREA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO E 1 PLANIALTIMÉTRICO

Discrepância Planimétrica		Discrepância Altimétrica	
Média (m)	EQM (m)	Média (m)	EQM (m)
0,230	0,271	-0,176	0,261

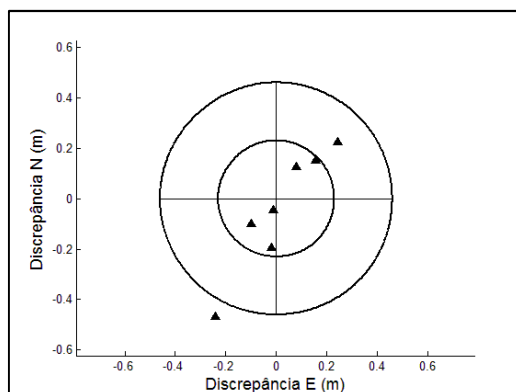


FIGURA 40 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO DO CAMPO DE PROVA E 1 PONTO PLANIALTIMÉTRICO

Analisando-se a Figura 41 e comparando-se as discrepâncias altimétricas com as obtidas em outras calibrações já realizadas com a mesma configuração de bloco, verifica-se melhor exatidão altimétrica em relação à CA7 e pior em relação à CA5. Resultados não esperados, pois o esperado era que a exatidão altimétrica fosse similar à obtida em CA7, uma vez que em ambas calibrações foram empregadas as mesmas informações altimétricas, e melhor do que a obtida em CA5, pois em CA8 foi incluída maior informação altimétrica no processo. Este resultado indica que a exatidão altimétrica da intersecção é dependente dos ângulos de orientação das imagens. Por outro lado, se for considerado somente o valor tolerável para a intersecção, a exatidão altimétrica obtida nesta calibração foi aceitável.

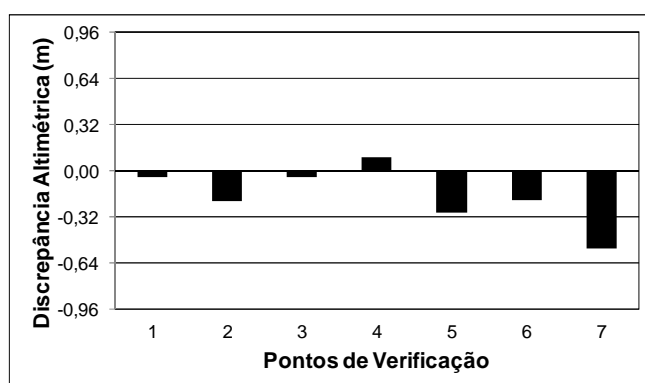


FIGURA 41 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CALIBRAÇÃO AÉREA UTILIZANDO PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO DO CAMPO DE PROVA E 1 PONTO PLANIALTIMÉTRICO

Além das análises já apresentadas dos resultados obtidos, feitas com base nos valores analíticos e nos gráficos, a verificação das exatidões também foi

realizada pela aplicação de testes estatísticos. A Tabela 54 apresenta os principais resultados dos testes estatísticos realizados considerando as exatidões toleráveis.

TABELA 54 - TESTES DE HIPÓTESE PARA AS EXATIDÕES DA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICOS DO CAMPO DE PROVA E 1 PLANIALTIMÉTRICO

Testes da Exatidão Planimétrica			Testes da Exatidão Altimétrica		
Teste de Normalidade (p valor)	t_{calc}	t_{α}	Teste de Normalidade (p valor)	t_{calc}	t_{α}
0,370	-0,008	1,943	0,212	-6,575	1,943

Observa-se pelos p valores dos testes de normalidade que as discrepâncias planimétricas e altimétricas dos pontos de verificação possuem uma distribuição normal. A análise do resultado estatístico do teste t de *Student* referente à avaliação da exatidão planimétrica demonstra que a hipótese H_0 não foi rejeitada, pois o valor calculado para a distribuição t foi menor que o valor tabelado, ou seja, a média populacional das discrepâncias planimétricas resultante do experimento pode ser considerada estatisticamente inferior ou igual a 0,23 m. Considerando o resultado estatístico do teste referente à exatidão altimétrica, verifica-se que o valor calculado para a distribuição t foi menor que o valor tabelado, ou seja, a hipótese H_0 também não foi rejeitada. Com base neste resultado pode-se afirmar com 95% de confiança que a média populacional das discrepâncias altimétricas do experimento é igual ou inferior a 0,64 m.

Finalizando, pode-se concluir que a calibração em serviço utilizando pontos de apoio altimétrico no bloco empregado não apresentou exatidões melhores do que as que foram obtidas no experimento de calibração realizado com 1 ponto de apoio planialtimétrico e nem mesmo do que as exatidões obtidas nos demais experimentos até aqui apresentados. Em outras palavras, a utilização de pontos de apoio altimétrico num bloco com somente um ponto de apoio planialtimétrico não melhora as exatidões planimétrica e altimétrica de uma calibração.

4.4.2 Calibração Aérea com pontos de apoio altimétrico e 2 pontos de apoio planialtimétrico

Apesar de ter sido verificado que a inclusão de pontos de apoio altimétrico no bloco não modificou os resultados da calibração com o uso de somente um ponto de apoio planialtimétrico, este experimento de calibração foi realizado para verificar se a utilização de 2 pontos de apoio nos extremos do bloco associados com apoio altimétrico não modificaria as exatidões do processo. O experimento foi motivado pelos resultados obtidos na calibração com somente dois pontos de apoio planialtimétrico (CA6) em que foi verificado um incremento de exatidão planimétrica em relação à calibração com somente 1 ponto no centro do bloco. Desta forma, o experimento utilizou 11 pontos de apoio altimétrico e 2 pontos de apoio planialtimétrico nos extremos do bloco (pontos sinalizados com quadrado na Figura 22). Além destes pontos de apoio foram planejados 96 pontos fotogramétricos de passagem e 7 pontos de verificação.

Observa-se na Tabela 55 que os valores de POI determinados nesta calibração (CA9) são praticamente iguais aos obtidos na calibração CA1, inclusive as precisões de determinação desses parâmetros.

TABELA 55 - POI DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O CAMPO DE PROVA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO E 02 PONTOS DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO

	f (mm)	σ_f (mm)	x_0 (mm)	σ_{x_0} (mm)	y_0 (mm)	σ_{y_0} (mm)	k_1 (mm ⁻²)	σ_{k_1} (mm ⁻²)	k_2 (mm ⁻⁴)	σ_{k_2} (mm ⁻⁴)
CA9	34,246	0,002	0,067	0,002	0,264	0,005	-9,096E-05	5,786E-07	1,042E-07	1,379E-09

Pelos EQM dos resíduos obtidos nas observações realizadas no procedimento e pelo resultado do teste global, dados apresentados na Tabela 56, pode-se afirmar que o ajustamento da calibração pode ser estatisticamente aceito.

TABELA 56 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O CAMPO DE PROVA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO E 02 APOIO PLANIALTIMÉTRICO

EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio e CPs					
EQM X (m)	EQM Y (m)	EQM Z (m)	EQM X ₀ (m)	EQM Y ₀ (m)	EQM Z ₀ (m)
0,011	0,002	0,002	0,056	0,047	0,096
EQM dos resíduos das fotocoordenadas e Teste Global					
EQM x (mm)	EQM y (mm)	gl	$\hat{\sigma}_0^2$	χ_a^2	$\chi_{(gl, 1-\alpha)}^2$
0,001	0,002	427	0,310	132,455	476,178

A matriz de correlação entre os POI, mostrada na Tabela 57, é praticamente igual à que foi obtida na calibração CA1. As correlações entre a distância focal e os parâmetros de distorção radial simétrica apareceram de forma similar às existentes

nas calibrações com pontos de apoio planialtimétrico. Este resultado mostra que os pontos de apoio altimétrico, no experimento realizado, podem ter assumido condições geométricas equivalentes aos planialtimétricos, uma vez que no experimento com somente 2 pontos de apoio planialtimétrico essas correlações não foram verificadas.

TABELA 57 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O CAMPO DE PROVA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO E 02 PLANIALTIMÉTRICO

Matriz de Correlação dos POI					
	f	x ₀	y ₀	k ₁	k ₂
f	1,000				
x ₀	0,052	1,000			
y ₀	0,129	0,001	1,000		
k ₁	-0,729	-0,011	0,076	1,000	
k ₂	0,649	0,004	-0,159	-0,970	1,000

Observa-se pela Tabela 58 que o valor da correlação entre y₀ e ω nesta calibração é também muito próximo do valor obtido na calibração CA1, evidenciando as semelhanças dos resultados obtidos.

TABELA 58 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O CAMPO DE PROVA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO E 02 APOIO PLANIALTIMÉTRICO

Correlação entre POI e POE					
	f	x ₀	y ₀	k ₁	k ₂
ω	0,102	0,070	0,858	0,069	0,142
φ	0,082	0,471	0,446	0,043	0,077
κ	0,071	0,053	0,061	0,013	0,027
X ₀	0,012	0,072	0,012	0,012	0,013
Y ₀	0,007	0,021	0,022	0,008	0,009
Z ₀	0,062	0,048	0,040	0,026	0,028

Através das discrepâncias planialtimétricas determinadas nos 7 pontos utilizados como verificação, foram determinadas as médias e os EQM das discrepâncias planimétricas e altimétricas (Tabela 59).

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 59 e Figuras 42 e 43 verifica-se que a configuração proposta de pontos de apoio aumentou consideravelmente a exatidão planimétrica. Enquanto que, na calibração com pontos de apoio altimétrico e 1 ponto de apoio planialtimétrico (CA8), o EQM das discrepâncias planimétrica foi de aproximadamente um GSD, nesta o valor passou a ser menor que a metade de um GSD. De forma geral, as exatidões planimétrica e altimétrica são equivalentes às obtidas no experimento de calibração empregando

pontos de apoio planialtimétrico (CA1). Os pontos de apoio altimétricos, na presença de dois pontos de apoio nos extremos do bloco, assumiram funções equivalentes à pontos de apoio planialtimétricos.

TABELA 59 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICA E ALTIMÉTRICA DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CALIBRAÇÃO COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO E 2 PLANIALTIMÉTRICO

Discrepância Planimétrica		Discrepância Altimétrica	
Média (m)	EQM (m)	Média (m)	EQM (m)
0,085	0,095	-0,127	0,260

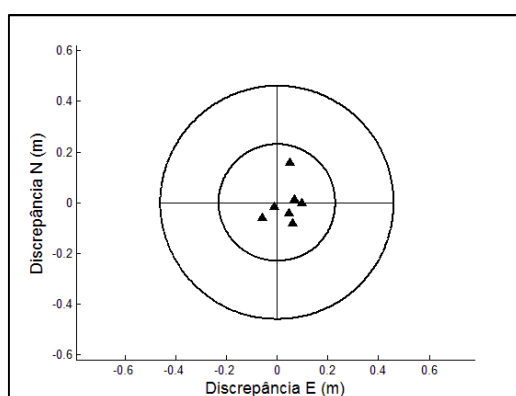


FIGURA 42 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO DO CAMPO DE PROVA E 2 PONTOS PLANIALTIMÉTRICOS

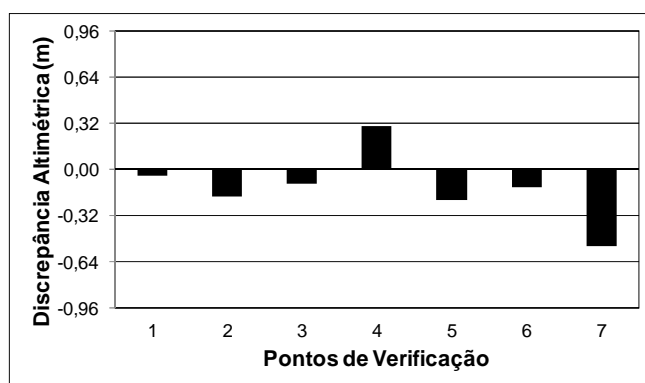


FIGURA 43 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CALIBRAÇÃO UTILIZANDO PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO DO CAMPO DE PROVA E 2 PONTOS PLANIALTIMÉTRICOS

Considerando as tolerâncias planimétricas e altimétricas adotadas neste trabalho, além das análises dos resultados já apresentadas, na Tabela 60 são mostrados os principais resultados dos testes estatísticos realizados.

TABELA 60 - TESTES DE HIPÓTESE PARA AS EXATIDÕES PLANIMÉTRICA E ALTIMÉTRICA NA CALIBRAÇÃO AÉREA UTILIZANDO PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO DO CAMPO DE PROVA E 2 APOIO PLANIALTIMÉTRICOS

Testes da Exatidão Planimétrica			Testes da Exatidão Altimétrica		
Teste de Normalidade (p valor)	t_{calc}	t_{α}	Teste de Normalidade (p valor)	t_{calc}	t_{α}
0,750	-8,511	1,943	0,310	-6,995	1,943

Os testes de normalidade realizados com as discrepâncias planimétricas e altimétricas demonstram que estes valores possuem uma distribuição normal. Através da análise dos testes paramétricos realizados pode-se observar que as exatidões planimétrica e altimétrica foram alcançadas, como mostradas e discutidas em CA1.

Considerando os resultados das calibrações realizadas com a utilização de pontos de apoio altimétricos e um planialtimétrico e a calibração com somente dois pontos de apoio planialtimétrico, o resultado excepcional obtido com a configuração experimentada pode ser ocasional. A realização de mais experimentos para comprovar a eficiência da configuração proposta será indispensável. Para esse estudo foram realizadas calibrações em serviço utilizando pontos de apoio altimétrico determinados com base nos dados de varredura *laser scanner*, tais resultados são apresentados nas seções a seguir.

4.4.3 Síntese dos resultados obtidos nos experimentos de calibração aérea utilizando número mínimo de pontos de apoio e pontos de apoio altimétrico

Apresenta-se nessa seção as principais conclusões sobre as calibrações aéreas realizadas utilizando número mínimo de pontos de apoio (CA5 e CA6) e pontos de apoio altimétrico (CA7, CA8 e CA9). Os resultados da calibração com voo convencional (CA1) são incluídos, simplesmente para fins de comparações. Na Tabela 61 são agrupados os POI determinados com as diferentes metodologias de calibração aérea aqui discutidas. Verifica-se que os POI determinados nas calibrações aéreas não apresentaram variação significativa. O parâmetro que apresentou maior variabilidade nas calibrações aéreas, acima mencionadas, em relação à calibração CA1 foi a distância focal, e neste caso, o experimento que mais se aproximou do valor determinado e da precisão de determinação do mesmo foi a

calibração CA9, em que foram utilizados pontos de apoio altimétrico associados com dois pontos de apoio planialtimétrico.

Nas Figuras 44 e 45 apresentam-se gráficos que mostram as curvas de distorção radial simétrica e as posições do PP no referencial da imagem, elaborados com base nos resultados obtidos nas calibrações aéreas aqui discutidas. Verifica-se que o comportamento da distorção radial simétrica e as posições do PP determinadas nas calibrações não apresentaram diferenças significativas. A Figura 45 mostra os PP das calibrações em diferentes posições, mas a rigor trata-se de variações no milésimo do milímetro que podem ser assumidas como sendo constantes, a menos do valor determinado na calibração CA7, no qual devido à utilização de somente pontos altimétricos, a exatidão planimétrica variou significativamente em relação às outras calibrações.

TABELA 61 - POI DETERMINADOS NAS CALIBRAÇÕES COM MÍNIMO DE APOIO E APOIO ALTIMÉTRICO

	f (mm)	σf (mm)	x_0 (mm)	σx_0 (mm)	y_0 (mm)	σy_0 (mm)	k_1 (mm ⁻²)	σk_1 (mm ⁻²)	k_2 (mm ⁻⁴)	σk_2 (mm ⁻⁴)
CA1	34,246	0,002	0,067	0,002	0,262	0,005	-9,101E-05	5,639E-07	1,043E-07	1,342E-09
CA5	34,238	0,006	0,068	0,002	0,261	0,006	-9,093E-05	5,771E-07	1,038E-07	1,369E-09
CA6	34,255	0,007	0,067	0,002	0,264	0,006	-9,091E-05	5,852E-07	1,039E-07	1,388E-09
CA7	34,233	0,003	0,069	0,002	0,266	0,005	-9,090E-05	5,460E-07	1,035E-07	1,304E-09
CA8	34,237	0,003	0,068	0,002	0,263	0,005	-9,093E-05	5,629E-07	1,039E-07	1,343E-09
CA9	34,246	0,002	0,067	0,002	0,264	0,005	-9,096E-05	5,786E-07	1,042E-07	1,379E-09

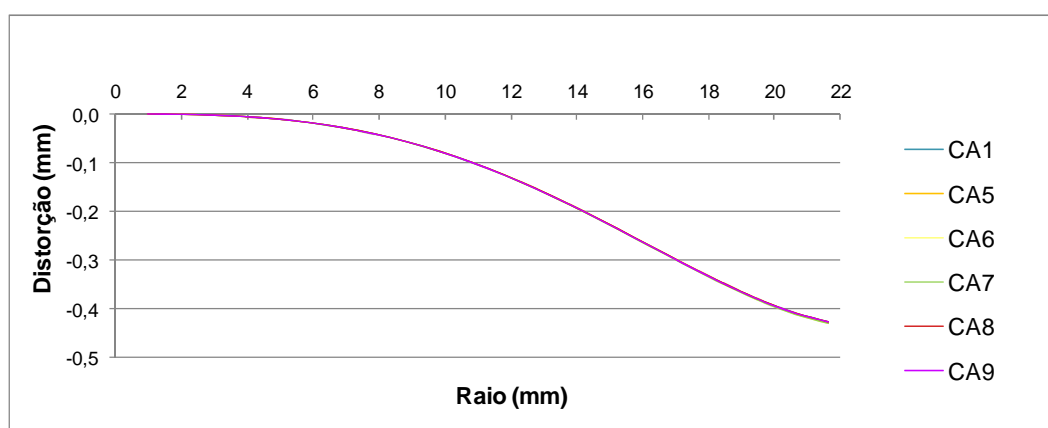


FIGURA 44 - CURVAS DA DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA DETERMINADAS NA CA1 E NAS CA COM NÚMERO MÍNIMO DE APOIO E APOIO ALTIMÉTRICO

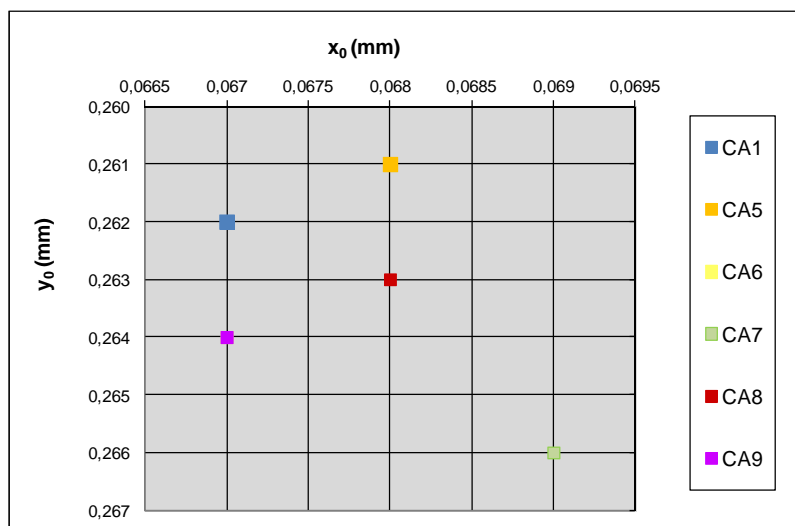


FIGURA 45 - POSIÇÃO DO PP DETERMINADA NA CA1 E NAS CA COM NÚMERO MÍNIMO DE APOIO E PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO

A Figura 46 apresenta os valores do EQM nas componentes planimétrica (a) e altimétrica (b) dos pontos de verificação nos experimentos de calibração aérea acima mencionados. Como já visto o experimento CA1 (em que foram utilizados 13 pontos de apoio planialtimétrico) foi o experimento que apresentou os menores EQM. Evidencia-se na representação gráfica que o experimento CA5, no qual foi utilizado 1 ponto de apoio planialtimétrico, possui EQM similares ao experimento CA8, em que foram adicionados 12 pontos de apoio altimétrico ao bloco. Desta forma, pode-se concluir que a utilização de pontos de apoio altimétrico associados com um ponto de apoio planialtimétrico não proporcionou vantagens ao processamento da calibração aérea.

O experimento CA6, no qual foram utilizados 2 pontos de apoio planialtimétricos, apresentou uma melhora significativa na planimetria quando comparado ao experimento CA5, porém esse experimento foi o que resultou no maior EQM altimétrico. Entretanto, quando compara-se os resultados dos experimentos CA6 e CA9 verifica-se que a inclusão dos pontos altimétricos (CA9) proporcionou um incremento significativo nas exatidões planimétrica e altimétrica obtidas na calibração.

E ainda, o experimento CA9 apresentou resultados similares ao experimento CA1 (com 13 pontos de apoio planialtimétrico), demonstrando a provável viabilidade de calibração em serviço utilizando pontos de apoio altimétrico determinados com

dados *laser scanner* em conjunto com dois pontos de apoio planialtimétricos nos extremos do bloco.

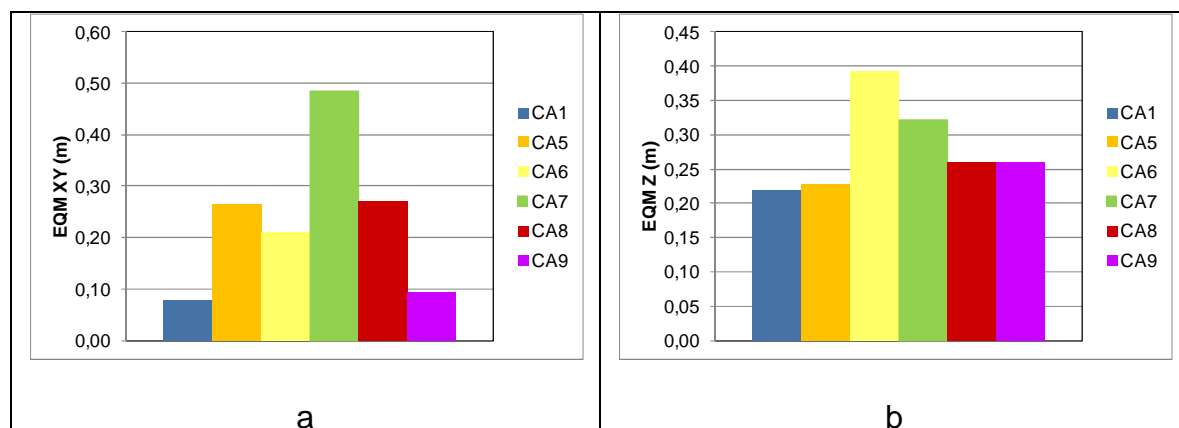


FIGURA 46 - a) EQM PLANIMÉTRICO DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO b) EQM ALTIMÉTRICO DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CA1 E NAS CA COM NÚMERO MÍNIMO DE APOIO E PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO

4.5 RESULTADOS OBTIDOS NA CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos na calibração em serviço (CS) utilizando como apoio as coordenadas altimétricas extraídas da nuvem de pontos do levantamento LIDAR e as coordenadas do CP da câmara.

Inicialmente, para verificar o desempenho do algoritmo proposto para a obtenção de coordenadas altimétricas com base na nuvem de pontos laser, realizou-se uma verificação empregando os pontos pré-sinalizados do campo de prova, pois nesses já são conhecidas suas coordenadas altimétricas com o levantamento GNSS. Assim, empregando a metodologia descrita no item 3.2.5.1 as coordenadas altimétricas desses pontos foram extraídas da nuvem de pontos LIDAR e comparadas com as determinadas no levantamento GNSS. Na Tabela 62 são apresentadas as coordenadas altimétricas dos pontos pré-sinalizados determinadas no levantamento GNSS e as respectivas determinadas pela metodologia proposta. Pode-se verificar que no ponto 13 a diferença entre as coordenadas foi muito discrepante das demais. Este fato ocorreu pela obstrução de rede elétrica na região do ponto e desta forma, a coordenada altimétrica extraída pelo algoritmo da nuvem de pontos *laser scanner* pode ter sido a coordenada de um ponto localizado não na superfície do arruamento, mas em cima da fiação.

TABELA 62 - ALTIMETRIA DOS PONTOS PRÉ-SINALIZADOS LEVANTADAS POR GNSS E EXTRAÍDAS DA NUVEM DE PONTOS LIDAR

ID	Z GNSS (m)	Z LIDAR (m)	Diferença (m)
1	943,790	944,010	0,220
2	951,800	952,010	0,210
3	931,660	931,910	0,250
4	933,830	934,170	0,340
5	936,320	936,500	0,180
6	947,810	947,930	0,120
7	939,300	939,450	0,150
8	955,520	955,700	0,180
9	962,770	962,980	0,210
10	958,360	958,370	0,010
11	962,000	962,070	0,070
12	960,340	960,380	0,040
13	957,140	963,320	6,180
14	957,740	957,960	0,220
15	949,790	949,920	0,130
16	944,160	944,330	0,170
17	938,600	938,750	0,150
18	945,560	945,820	0,260
19	932,700	932,940	0,240
20	912,380	912,550	0,170
média			0,175
desv. pad.			0,079
EQM			0,191

Eliminando-se o ponto que apresentou problemas na determinação da altimetria, o EQM das discrepâncias altimétricas foi de 0,191 m. Desconsiderando uma tendência nos dados altimétricos de aproximadamente 0,17 m (Figura 47), a metodologia empregada pode ser admitida como sendo apropriada, como pode ser visto no valor do desvio padrão amostral de 0,079 m, valor esse bem abaixo da precisão altimétrica nominal de um levantamento com o sistema LIDAR (0,15 m). A causa dessa tendência não foi investigada nessa pesquisa, podendo estar relacionada com imprecisões na calibração do sistema. Se for considerada a exatidão do processo com base no EQM que leva em conta a tendência, pode-se considerar que a exatidão altimétrica obtida está um pouco acima da precisão nominal. Esse valor não inviabiliza sua utilização nessa pesquisa, pois o valor da exatidão altimétrica da intersecção fotogramétrica, dada em função da base/altura de voo (0,64 m), é bem acima desse valor de tendência.

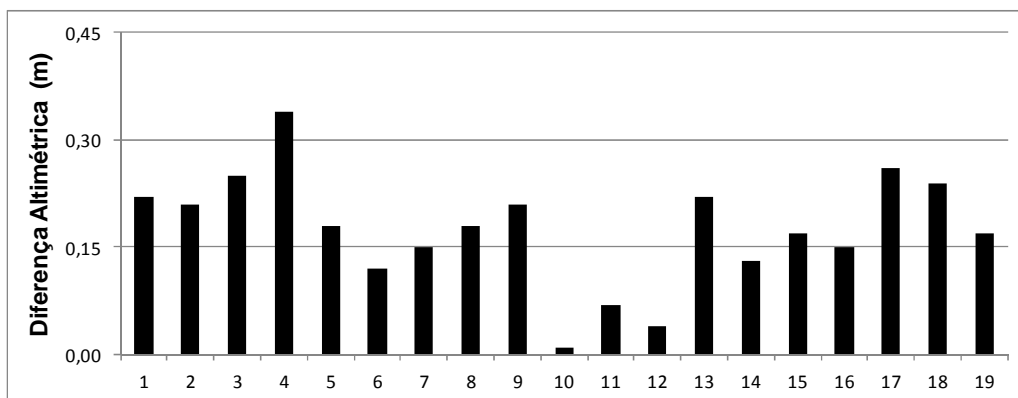


FIGURA 47 - DIFERENÇAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS PRÉ-SINALIZADOS

O desvio padrão obtido nas coordenadas altimétricas interpoladas pode ser melhorado quando a interpolação for aplicada nos pontos de passagem. Nos pontos de apoio pode ter ocorrido um erro de interpolação pelo fato desses estarem próximos ao meio fio. No caso dos pontos de passagem, quase que sempre, esses foram definidos no centro dos arruamentos, região que pode ser considerada quase plana, diminuindo a possibilidade de erros no processo.

Após a etapa de depuração de erros grosseiros do processo de interpolação, dos 96 pontos fotogramétricos de passagem que compõem o bloco fotogramétrico das faixas 1 e 2 do campo de prova, 84 pontos foram considerados como pontos de apoio altimétrico. A Figura 48 apresenta a distribuição dos 84 pontos fotoidentificáveis das faixas 1 e 2 do bloco fotogramétrico de Ponta Grossa. As coordenadas altimétricas de tais pontos foram extraídas da nuvem de pontos LIDAR de acordo com a metodologia apresentada na seção 3.2.5.1.

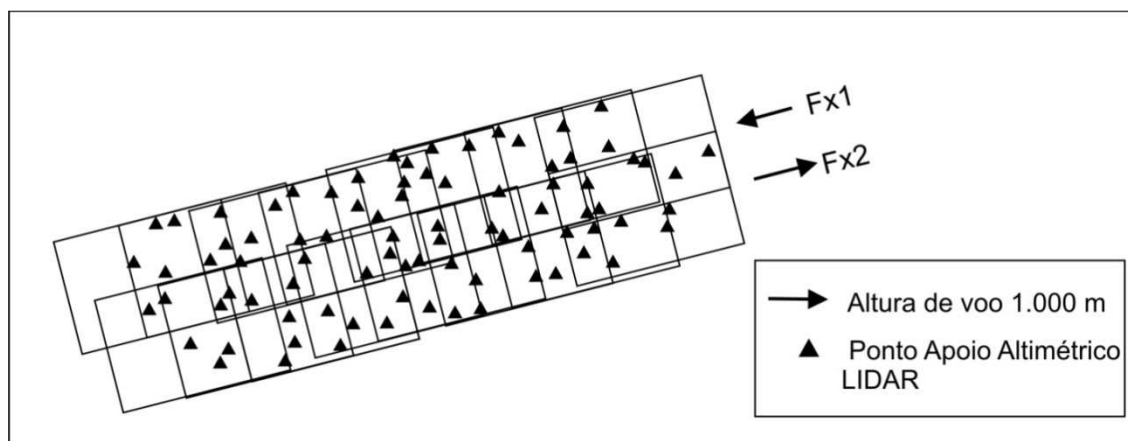


FIGURA 48 - DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO EXTRAÍDOS DA NUVEM DE PONTOS LIDAR NAS FOTOGRAFIAS TOMADAS A 1.000M

4.5.1 Calibração em Serviço

Apesar do experimento de calibração CA7 não alcançar a exatidão planimétrica tolerável, verificou-se nesse experimento se o incremento do número de pontos altimétricos melhoraria a exatidão planimétrica da calibração em serviço. Dessa forma, a calibração foi realizada com um conjunto de 84 pontos fotogramétricos como sendo pontos de apoio altimétrico, de acordo com a distribuição apresentada na Figura 48.

Como as coordenadas dos pontos de apoio foram extraídas da nuvem de pontos LIDAR, foi adotada como precisão altimétrica o valor nominal da precisão de um levantamento LIDAR (0,15 m). A Tabela 63 apresenta os POI determinados na calibração em serviço, denominada de CS1.

TABELA 63 - POI DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO

	f (mm)	σ_f (mm)	x_0 (mm)	σ_{x_0} (mm)	y_0 (mm)	σ_{y_0} (mm)	k_1 (mm ⁻²)	σ_{k_1} (mm ⁻²)	k_2 (mm ⁻⁴)	σ_{k_2} (mm ⁻⁴)
CS1	34,244	0,004	0,070	0,003	0,264	0,005	-9,177E-05	7,974E-07	1,061E-07	1,883E-09

A menos do valor determinado para a distância focal, observa-se na Tabela 63 que os outros POI são muito similares aos que foram obtidos na calibração CA7. O valor da distância focal aproxima-se mais do que foi obtido na calibração CA1, modificando o comportamento da exatidão altimétrica se comparada com a que foi obtida na calibração CA7. Pelos resultados apresentados na Tabela 64 pode-se verificar que o EQM dos resíduos nas coordenadas dos pontos de apoio foram inferiores ao valor da precisão admitida no processo, assim como os EQM dos resíduos das coordenadas do CP e das fotocoordenadas. O resultado do teste global realizado e a análise dos resíduos apresentados permitem concluir que as precisões do ajustamento realizado podem ser estatisticamente aceitas.

TABELA 64 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO

EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio e CPs					
EQM X (m)	EQM Y (m)	EQM Z (m)	EQM X ₀ (m)	EQM Y ₀ (m)	EQM Z ₀ (m)
-	-	0,130	0,063	0,052	0,086
EQM dos resíduos das fotocoordenadas e Teste Global					
EQM x (mm)	EQM y (mm)	gl	$\hat{\sigma}_0^2$	χ_a^2	$\chi_{(gl, 1-\alpha)}^2$
0,002	0,002	494	0,679	335,673	546,814

A matriz de correlação entre os POI determinados na calibração em serviço é apresentada na Tabela 65. Assim como visto na calibração CA7, realizada somente com pontos de apoio altimétrico do campo de prova, não foram verificadas as correlações entre a distância focal e os parâmetros de distorção radial simétrica. Esta correlação aparece com maior destaque quando se utiliza de no mínimo dois pontos de apoio planialtimétrico no bloco.

TABELA 65 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO

Matriz de Correlação dos POI					
	f	x_0	y_0	k_1	k_2
f	1,000				
x_0	-0,010	1,000			
y_0	0,105	0,055	1,000		
k_1	-0,535	0,019	0,075	1,000	
k_2	0,499	-0,031	-0,115	-0,971	1,000

A Tabela 66 apresenta os valores das correlações entre POI e POE, onde se observa a inexistência de correlações acima de 0,7, fato que pode ser ocasionado pela não utilização de pontos de apoio planialtimétrico. Como não foram utilizados pontos de apoio planialtimétrico, as orientações das imagens não precisaram se adaptar às coordenadas dos pontos de apoio no espaço objeto, possibilitando desta forma a sua determinação de forma mais independente da posição do PP.

TABELA 66 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO

Correlação entre POI e POE					
	f	x_0	y_0	k_1	k_2
ω	0,079	0,216	0,572	0,047	0,073
φ	0,295	0,395	0,245	0,034	0,032
κ	0,044	0,356	0,051	0,016	0,021
X_0	0,042	0,067	0,011	0,011	0,012
Y_0	0,013	0,021	0,035	0,009	0,009
Z_0	0,124	0,082	0,039	0,025	0,026

Igualmente ao empregado nos experimentos de calibração com pontos de apoio pré-sinalizados, foram admitidas como exatidão planimétrica e altimétrica esperada nos processamentos de calibração em serviço os valores de 0,23 m e 0,64 m. Para a verificação da exatidão obtida no processamento de calibração em serviço foram utilizados todos os 20 pontos pré-sinalizados existentes nas faixas 1 e 2 do bloco fotogramétrico do campo de prova. Pode-se observar pela Tabela 67, que

assim como no experimento CA7, a média das discrepâncias planimétricas e o EQM planimétrico foi superior a 2 GSD. E ainda pela análise da Figura 49 e do resultado do teste estatístico apresentado no Apêndice 01 percebe-se uma acentuada tendência planimétrica nas discrepâncias dos pontos de verificação. A tendência observada nas discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação para a direção SE foi semelhante à da calibração utilizando pontos de apoio altimétrico do campo de prova (CA7). Pode-se aqui, novamente, atribuir como prováveis causas desta tendência a possíveis imprecisões na determinação das coordenadas planimétricas X_0 e Y_0 do CP da câmara, pois os parâmetros "shift" e "drift" não foram modelados no processamento dos dados.

TABELA 67 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO

Discrepância Planimétrica		Discrepância Altimétrica	
Média (m)	EQM (m)	Média (m)	EQM (m)
0,526	0,558	-0,062	0,247

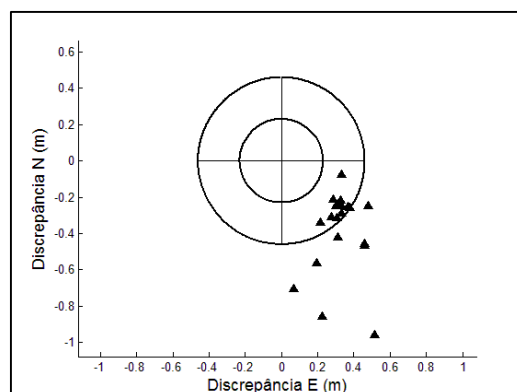


FIGURA 49 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO

Apesar da calibração não apresentar exatidão planimétrica aceitável, a exatidão altimétrica foi muito superior à que foi obtida na calibração CA7 e aproximou-se do valor encontrado na calibração CA1 com somente pontos de apoio planialtimétrico. Na Figura 50 observa-se que todas as discrepâncias altimétricas dos pontos utilizados como verificação da calibração em serviço apresentaram valores inferiores ao valor tolerado de 0,64 m. A tendência na altimetria, verificada nas coordenadas extraídas da nuvem de pontos *laser*, não apareceu nessa análise. A precisão da intersecção fotogramétrica de 0,64 m, nos 20 pontos de verificação,

pode ter compensado a tendência altimétrica de 0,17 m existente nos 84 pontos fotogramétricos utilizados como apoio.

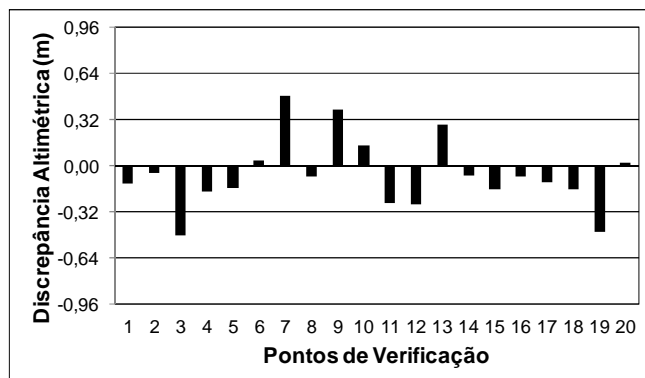


FIGURA 50 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO

A Tabela 68 apresenta os principais resultados dos testes estatísticos realizados com as discrepâncias planimétricas e altimétricas dos pontos de verificação.

TABELA 68 - TESTES DE HIPÓTESE PARA AS EXATIDÕES PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS DA CS

Testes da Exatidão Planimétrica			Testes da Exatidão Altimétrica		
Teste de Normalidade (p valor)	t_{calc}	t_{α}	Teste de Normalidade (p valor)	t_{calc}	t_{α}
0,001	6,919	1,729	0,016	-13,097	1,729

Observa-se pelo p valor do teste de normalidade realizado com as discrepâncias planimétricas que este é inferior a 0,05, ou seja, as discrepâncias planimétricas não possuem uma distribuição normal. Foi realizado o teste não paramétrico de *Wilcoxon* para a verificar se a média populacional das discrepâncias planimétricas é igual ou inferior a 0,23 m. O p valor determinado no teste de *Wilcoxon* corrobora com o resultado do teste t, podendo-se afirmar com 95% de confiança que a exatidão planimétrica tolerável não foi obtida nesta calibração.

O p valor determinado no teste de normalidade realizado com as discrepâncias altimétricas também é inferior a 0,05, ou seja, as discrepâncias altimétricas não possuem uma distribuição normal. O p valor de 1, determinado no teste não paramétrico de *Wilcoxon*, corrobora com o resultado do teste t realizado.

Pode-se afirmar com 95% de confiança que a média populacional das discrepâncias altimétricas é igual ou inferior a 0,64 m.

Pelos resultados do experimento de calibração em serviço realizado, verifica-se que a exatidão planimétrica esperada de 0,23 m não foi obtida, embora os resultados demonstrem que foi possível obter a exatidão altimétrica tolerável.

Os resultados desta calibração em serviço confirmam a conclusão, apresentada na CA7, de que é inviável obter a exatidão planimétrica tolerável de um GSD, realizando a calibração com o emprego de somente pontos de apoio altimétricos, sejam estas coordenadas determinadas por meio de levantamento GNSS ou extraídas da nuvem de pontos *laser scanner*.

4.5.2 Calibração em Serviço com 1 ponto de apoio planialtimétrico

O experimento teve por objetivo verificar se a tendência planimétrica encontrada no experimento anterior pode ser minimizada com a inclusão de um ponto de apoio planialtimétrico no bloco. Além dos 84 pontos de apoio altimétrico, extraídos dos dados do sistema LIDAR, foi utilizado 1 ponto de apoio planialtimétrico localizado, aproximadamente, no centro do bloco (ponto sinalizado com um quadrado na Figura 22). A precisão altimétrica para os 84 pontos de apoio foi a mesma adotada no experimento anterior (0,15 m). Somente as coordenadas do ponto de apoio planialtimétrico foram ponderadas com a mesma precisão atingida no levantamento GNSS (0,03 m). A Tabela 69 apresenta os POI determinados na calibração em serviço denominada de CS2.

TABELA 69 - POI DETERMINADOS NA CS COM 1 PONTO DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO

	f (mm)	σ_f (mm)	x_0 (mm)	σx_0 (mm)	y_0 (mm)	σy_0 (mm)	k_1 (mm ⁻²)	σk_1 (mm ⁻²)	k_2 (mm ⁻⁴)	σk_2 (mm ⁻⁴)
CS2	34,247	0,004	0,070	0,003	0,265	0,005	-9,187E-05	8,048E-07	1,065E-07	1,896E-09

Pode-se observar que os POI determinados são muito similares aos que foram obtidos na calibração anterior (CS1). Na Tabela 70 apresentam-se os EQM dos resíduos do ajustamento e o resultado do teste global. De forma similar ao experimento anterior, pode-se concluir que as precisões das observações determinadas no ajustamento da calibração estão de acordo com as precisões admitidas no processo.

TABELA 70 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CS COM 1 PONTO DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO

EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio e CPs					
EQM X (m)	EQM Y (m)	EQM Z (m)	EQM X ₀ (m)	EQM Y ₀ (m)	EQM Z ₀ (m)
0,021	0,003	0,129	0,069	0,052	0,081
EQM dos resíduos das fotocoordenadas e Teste Global					
EQM x (mm)	EQM y (mm)	gl	$\hat{\sigma}_0^2$	χ_a^2	$\chi_{(gl,1-\alpha)}^2$
0,003	0,002	497	0,694	345,067	549,970

Na Tabela 71 é apresentada a matriz de correlação entre os POI da calibração. Assim como no experimento CA8, no qual foram utilizados como apoio as coordenadas altimétricas dos alvos do campo de prova e 1 ponto planialtimétrico, verifica-se um pequeno incremento na correlação entre os parâmetros f com k_1 e k_2 . Como já mencionado, a fixação do referencial planialtimétrico com pontos de apoio provoca correlação entre esses parâmetros, como será comprovado no próximo experimento. A correlação entre os parâmetros k_1 e k_2 da distorção radial simétrica, considerada como sendo normal, não sofreu alterações, como em todas as calibrações aéreas realizadas.

TABELA 71 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CS COM 1 PONTO DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO

Matriz de Correlação dos POI					
	f	x_0	y_0	k_1	k_2
f	1,000				
x_0	0,005	1,000			
y_0	0,095	0,062	1,000		
k_1	-0,539	0,017	0,082	1,000	
k_2	0,495	-0,024	-0,124	-0,973	1,000

A Tabela 72 apresenta os valores médios em módulo de coeficientes de correlação entre POI e POE. Nas calibrações realizadas com configuração de bloco de voo convencional, as correlações entre ω com y_0 aparecem como sendo as maiores. Comparando-se os valores obtidos nessa calibração com os da CA8, que utilizou menor número de pontos de apoio altimétrico e 1 ponto de apoio planialtimétrico, verifica-se uma pequena diminuição do coeficiente de correlação. O valor de 0,77 (obtido na CA8) foi modificado para 0,67. Uma provável causa dessa atenuação pode estar relacionada com a utilização de um grande número de pontos de apoio altimétrico o que garantiu maior rigidez geométrica ao bloco.

TABELA 72 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE DETERMINADOS NA CS COM 1 PONTO DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO

	Correlação entre POI e POE				
	f	x ₀	y ₀	k ₁	k ₂
ω	0,072	0,238	0,670	0,060	0,091
φ	0,314	0,430	0,263	0,038	0,034
κ	0,028	0,363	0,054	0,018	0,012
X ₀	0,040	0,067	0,012	0,012	0,012
Y ₀	0,012	0,020	0,035	0,009	0,009
Z ₀	0,123	0,080	0,040	0,027	0,028

Para a verificação das exatidões alcançadas com esta calibração em serviço foram utilizados 19 pontos pré-sinalizados das faixas 1 e 2, que não participaram do ajustamento. A Tabela 73 apresenta as médias das discrepâncias planimétrica e altimétrica e os EQM resultantes. Verifica-se que a adição de um único ponto de apoio no terreno reduziu a média das discrepâncias planimétricas para aproximadamente 1 GSD.

TABELA 73 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CS COM 1 PONTO DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO

Discrepância Planimétrica		Discrepância Altimétrica	
Média (m)	EQM (m)	Média (m)	EQM (m)
0,247	0,337	-0,062	0,233

A Figura 51 apresenta a distribuição das discrepâncias planimétricas. Observa-se que a tendência apresentada na calibração em serviço somente com pontos de apoio extraídos do LIDAR foi minimizada, mas ainda não se pode afirmar que a tendência foi eliminada, como confirmado pelo teste estatístico realizado (Apêndice 01). Verifica-se que em todos os pontos de verificação, localizados nos extremos do bloco, as discrepâncias planimétricas foram superiores a 1 GSD, confirmando o resultado obtido no experimento CA8. Mesmo com a inclusão de um número elevado de pontos de apoio altimétrico, a calibração CS2 não alcançou a exatidão planimétrica equivalente à obtida na calibração CA1.

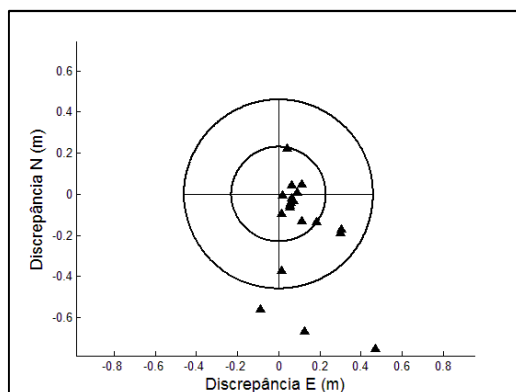


FIGURA 51 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CS COM 1 PONTO DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO

Pelo gráfico das discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação, apresentado na Figura 52, é possível observar resultados similares aos que foram obtidos na calibração anterior (CS1). Nestes experimentos todos os pontos de verificação apresentaram valores de discrepância altimétrica inferior ao tolerável.

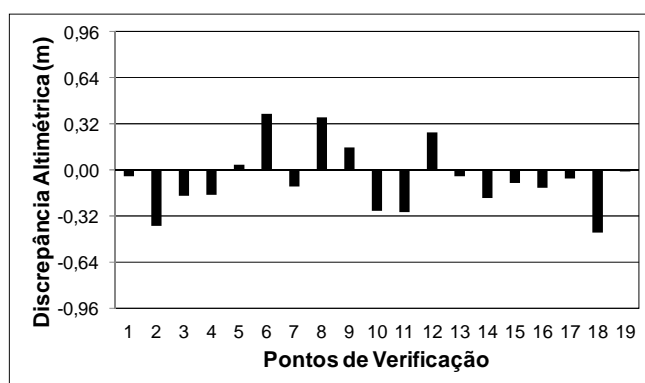


FIGURA 52 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CS COM 1 PONTO DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO

A Tabela 74 apresenta os resultados obtidos nos testes estatísticos realizados com a finalidade de verificar se as médias das discrepâncias planimétricas e altimétricas dos pontos de verificação foram iguais ou inferiores aos valores tolerados de 0,23 m para a planimetria e 0,64 m para a altimetria.

TABELA 74 - TESTES DE HIPÓTESE PARA AS EXATIDÕES PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS DA CS COM 1 PONTO DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO

Testes da Exatidão Planimétrica			Testes da Exatidão Altimétrica		
Teste de Normalidade (p valor)	t_{calc}	t_{α}	Teste de Normalidade (p valor)	t_{calc}	t_{α}
0,0005	0,109	1,729	0,100	-14,637	1,729

Observa-se que as discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação não foram consideradas como uma distribuição normal em relação à média. Desta forma foi utilizado um teste não paramétrico para verificar se a exatidão planimétrica foi atingida. O p valor determinado no teste de *Wilcoxon*, de 0,844, corrobora com o resultado do teste t de *Student*. Pelos resultados destes testes a média populacional das discrepâncias planimétricas é igual ou inferior a um GSD (0,23 m). Desta forma, a exatidão planimétrica esperada foi atingida ao se incluir 1 ponto de apoio planialtimétrico na calibração em serviço com os dados LIDAR, apesar de uma pequena tendência verificada na planimetria.

Pelo teste de normalidade de *Shapiro-Wilk* realizado com as discrepâncias altimétricas pode-se verificar que estas possuem uma distribuição normal. O resultado do teste t de *Student* realizado permite concluir-se que a média populacional destas discrepâncias é igual ou inferior a 0,64 m.

Verifica-se que o EQM planimétrico obtido neste experimento de calibração é 6 cm maior que o EQM determinado no experimento CA8, no qual foram empregados menor número de pontos de apoio altimétricos e 1 ponto de apoio planialtimétrico. Contudo, o EQM altimétrico determinado neste experimento é 3 cm menor que o EQM determinado no experimento CA8. Esta melhora na exatidão altimétrica pode ser atribuída à maior quantidade de pontos de apoio altimétrico empregada nesta calibração.

4.5.3 Calibração em Serviço com 2 pontos de apoio planialtimétrico

Como verificado no experimento de calibração CA9, a utilização de dois pontos de apoio planialtimétrico nos extremos do bloco com um pequeno número de pontos de apoio altimétrico aumentou consideravelmente a exatidão da calibração com o uso de pontos altimétricos no bloco analisado. Com base nesse experimento e nos resultados obtidos no experimento anterior, foi realizada a calibração utilizando além dos 84 pontos de apoio altimétrico extraídos dos dados do sistema LIDAR, 2 pontos de apoio planialtimétrico localizados nos extremos do bloco (pontos sinalizados com quadrado na Figura 22). Neste experimento, denominado de CS3, foram determinados os POI, apresentados na Tabela 75.

TABELA 75 - POI DETERMINADOS NA CS COM 2 PONTOS DE APOIO PLANIMÉTRICO

	f (mm)	σ_f (mm)	x_0 (mm)	σx_0 (mm)	y_0 (mm)	σy_0 (mm)	k_1 (mm ⁻²)	σk_1 (mm ⁻²)	k_2 (mm ⁻⁴)	σk_2 (mm ⁻⁴)
CS3	34,247	0,003	0,068	0,002	0,267	0,005	-9,189E-05	8,229E-07	1,064E-07	1,945E-09

Observa-se que os POI determinados neste experimento são muito similares aos determinados na calibração anterior (CS2). Os EQM dos resíduos do ajustamento e o teste global realizado, apresentados na Tabela 76, permitem concluir que os resultados do ajustamento da calibração em serviço podem ser estatisticamente aceitos.

TABELA 76 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CS COM 2 PONTOS DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO

EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio e CPs					
EQM X (m)	EQM Y (m)	EQM Z (m)	EQM X ₀ (m)	EQM Y ₀ (m)	EQM Z ₀ (m)
0,015	0,009	0,132	0,071	0,054	0,095
EQM dos resíduos das fotocoordenadas e Teste Global					
EQM x (mm)	EQM y (mm)	gl	$\hat{\sigma}_0^2$	χ_a^2	$\chi_{(gl, 1-\alpha)}^2$
0,003	0,002	500	0,729	364,500	553,127

Observa-se pela matriz de correlação entre POI, apresentada na Tabela 77, que houve um incremento considerável dos coeficientes de correlação entre a distância focal e os parâmetros de distorção radial simétrica se comparado com a calibração anterior. Como já mencionado, a utilização de pontos de apoio planialtimétrico provoca incremento nessas correlações. A imprecisão na coordenada Z₀ do CP ou problemas de distorção do raio de luz pela variabilidade dos índices de refração atmosférica foram inicialmente admitidas como prováveis causas dessas correlações. Entretanto, quando o referencial planialtimétrico não é completamente fixo com pontos de apoio, essas correlações não são verificadas e a exatidão planimétrica é deteriorada, como podem ser vistas nas calibrações (CA5, CA6, CA7, CA8, CS1, CS2). Conclui-se que, nas calibrações onde o referencial planialtimétrico é fixado com pontos de apoio, existe uma acomodação da distância focal e coordenada Z₀ (dentro de sua precisão) que pode refletir em correlações nos parâmetros que modelam a distorção radial simétrica, pois essa é correlacionada com variação da distância focal.

TABELA 77 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CS COM 2 PONTOS DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO

Matriz de Correlação dos POI					
	f	x ₀	y ₀	k ₁	k ₂
f	1,000				
x ₀	0,026	1,000			
y ₀	0,035	0,046	1,000		
k ₁	-0,800	0,004	0,074	1,000	
k ₂	0,723	-0,018	-0,117	-0,973	1,000

Analisando a Tabela 78, que apresenta as correlações entre POI e POE, verifica-se que a correlação entre os parâmetros ω com y_0 aumentou se comparado com a anterior. Valor esperado, pois com a fixação do referencial planialtimétrico no terreno, houve a necessidade de acomodações no ângulo ω e posição y_0 do PP, uma vez que as coordenadas dos CP no espaço objeto também estão injuncionadas. Desta forma, a determinação da posição do PP tornou-se mais dependente das compensações angulares exigidas para a fixação tridimensional dos raios de luz. Por outro lado, se o valor do coeficiente de correlação for comparado com o determinado na CA9 (0,86), comprova-se aqui que o incremento de pontos de apoio altimétrico atenua a correlação entre ω com y_0 .

TABELA 78 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE DETERMINADOS NA CS COM 2 PONTOS DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO

Correlação entre POI e POE					
	f	x ₀	y ₀	k ₁	k ₂
ω	0,085	0,126	0,745	0,064	0,098
φ	0,089	0,500	0,303	0,026	0,031
κ	0,091	0,053	0,071	0,018	0,017
X ₀	0,011	0,076	0,011	0,011	0,012
Y ₀	0,007	0,022	0,035	0,008	0,009
Z ₀	0,080	0,047	0,032	0,025	0,027

Neste experimento foram utilizados como pontos de verificação, os 18 pontos pré-sinalizados, localizados nas faixas 1 e 2, que não participaram do ajustamento. Na Tabela 79 são apresentadas as médias das discrepâncias planimétricas e altimétricas calculadas e os EQM dos pontos de verificação.

TABELA 79 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CS COM 2 PONTOS DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO

Discrepância Planimétrica		Discrepância Altimétrica	
Média (m)	EQM (m)	Média (m)	EQM (m)
0,097	0,107	-0,097	0,219

Observa-se que a média das discrepâncias planimétrica é menor que $1/2$ GSD e como podem ser observados na Figura 53 que todos os pontos de verificação apresentaram discrepâncias planimétricas inferiores a 1 GSD. Entretanto, verifica-se pelo teste de tendência, apresentado no Apêndice 01, que ocorreu uma pequena tendência na direção N, mas ainda menor que $1/2$ GSD. Comparando-se as exatidões planimétricas obtidas verifica-se que a exatidão dessa calibração é muito similar à que foi obtida na calibração realizada com pontos de apoio planialtimétrico (CA1).

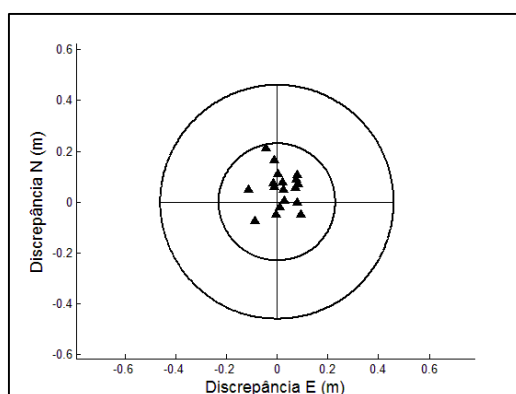


FIGURA 53 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CS COM 2 PONTOS DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO

O gráfico contendo as discrepâncias altimétrica dos pontos de verificação, apresentado na Figura 54, demonstra que em todos os pontos de verificação a discrepância altimétrica foi inferior ao valor tolerável, e que estas não apresentaram uma tendência (Apêndice 01)

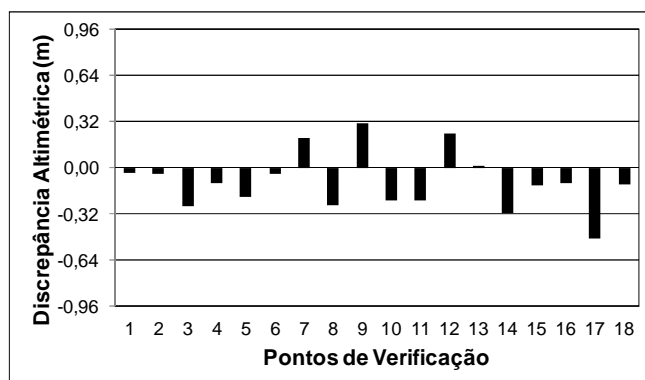


FIGURA 54 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CS COM 2 PONTOS DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO

Na Tabela 80 são apresentados os resultados dos testes estatísticos realizados com as discrepâncias dos pontos de verificação. Observa-se pelos testes de normalidade realizados, que tanto as discrepâncias planimétricas quanto as discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação possuem uma distribuição normal.

TABELA 80 - TESTES DE HIPÓTESE PARA AS EXATIDÕES DA CS COM DOIS PONTOS DE APOIO PLANIALTIMÉTRICO

Testes da Exatidão Planimétrica			Testes da Exatidão Altimétrica		
Teste de Normalidade (p valor)	t_{calc}	t_{α}	Teste de Normalidade (p valor)	t_{calc}	t_{α}
0,564	-11,869	1,739	0,213	-15,789	1,739

Pela análise do teste t de *Student* realizado com as discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação, é possível afirmar com 95% de confiança que a média populacional das discrepâncias planimétricas é igual ou inferior ao valor tolerável de 1 GSD. Com base no teste t de *Student* realizado com as discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação, é possível afirmar com 95% de confiança que a média populacional destas discrepâncias é igual ou inferior ao valor tolerável de 0,64 m.

Baseando-se neste resultado, observa-se que a utilização de dois pontos de apoio planialtimétrico nos extremos do bloco proporcionou maior exatidão dos resultados obtidos com a metodologia de calibração em serviço utilizando pontos de apoio altimétrico com coordenadas extraídas da nuvem de pontos LIDAR para o bloco de imagens empregado nessa pesquisa.

Através dos resultados obtidos pode-se concluir que a calibração em serviço com um conjunto denso de pontos de apoio altimétrico e a adição de dois pontos de apoio planialtimétrico apresentou exatidões superiores ao experimento de calibração realizado somente com 2 pontos de apoio planialtimétrico (CA6). Este resultado demonstra que a inclusão de pontos de apoio altimétrico, extraídos da nuvem de pontos LIDAR, resultaram em maior exatidão nos processos de calibração.

4.5.4 Síntese dos resultados obtidos nos experimentos de calibração em serviço

Apresentam-se nessa seção as principais conclusões sobre as calibrações em serviço realizadas utilizando pontos de apoio altimétrico com coordenadas determinadas por meio da nuvem de pontos *laser scanner* (CS1, CS2 e CS3). Os resultados da calibração com voo convencional (CA1) são incluídos, simplesmente para fins de comparações. Na Tabela 81 são agrupados os POI determinados com a calibração CA1 e com as diferentes metodologias de calibração em serviço aqui discutidas. Verifica-se que os POI determinados nos diferentes experimentos de calibração em serviço apresentam similaridade com os determinados na CA1.

TABELA 81 - POI DETERMINADOS NA CA1 E NAS CALIBRAÇÕES EM SERVIÇO

	f (mm)	σf (mm)	x_0 (mm)	σx_0 (mm)	y_0 (mm)	σy_0 (mm)	k_1 (mm ⁻²)	σk_1 (mm ⁻²)	k_2 (mm ⁻⁴)	σk_2 (mm ⁻⁴)
CA1	34,246	0,002	0,067	0,002	0,262	0,005	-9,101E-05	5,639E-07	1,043E-07	1,342E-09
CS1	34,244	0,004	0,070	0,003	0,264	0,005	-9,177E-05	7,974E-07	1,061E-07	1,883E-09
CS2	34,247	0,004	0,070	0,003	0,265	0,005	-9,187E-05	8,048E-07	1,065E-07	1,896E-09
CS3	34,247	0,003	0,068	0,002	0,267	0,005	-9,189E-05	8,229E-07	1,064E-07	1,945E-09

Na Figura 55 são apresentadas as curvas da distorção radial simétrica resultantes das quatro calibrações. Assim como verificado nas análises anteriores, os parâmetros da distorção radial simétrica não apresentaram diferenças significativas nos processamentos de calibração realizados.

A Figura 56 apresenta a disposição das coordenadas do PP determinadas nos processamentos de calibração. Igualmente como nas análises anteriores verifica-se que as posições do PP determinadas na CA1 e nas CS apresentam variações na ordem do milionésimo do milímetro. A maior variação encontra-se na coordenada y_0 entre a calibração CA1 e CS3. Apesar dessa variação, a diferença entre as exatidões planialtimétricas não foram significativas. Entretanto, ao se confrontar os coeficientes de correlação entre ω e y_0 , percebe-se que este coeficiente é maior na calibração CA1, evidenciando uma maior acomodação desses elementos uma vez que foram empregados um número maior de pontos de apoio planialtimétrico.

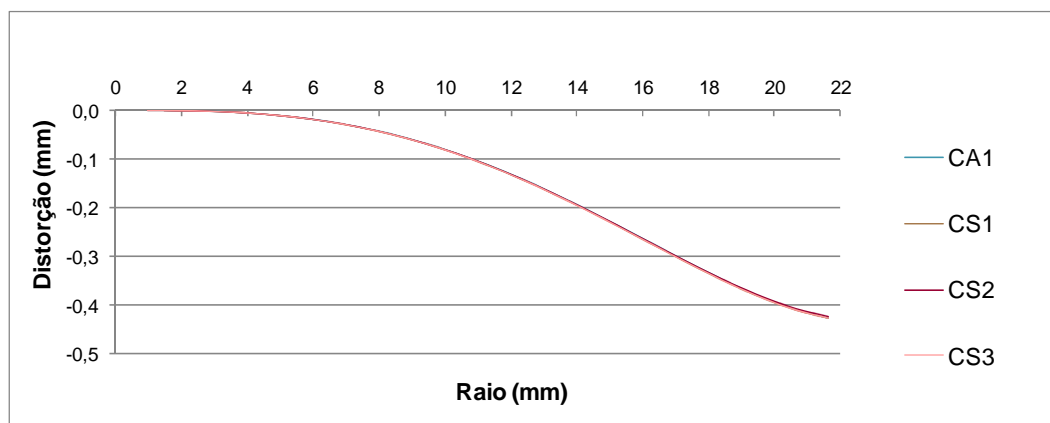


FIGURA 55 - CURVAS DA DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA DETERMINADAS NA CA1 E NAS CALIBRAÇÕES EM SERVIÇO

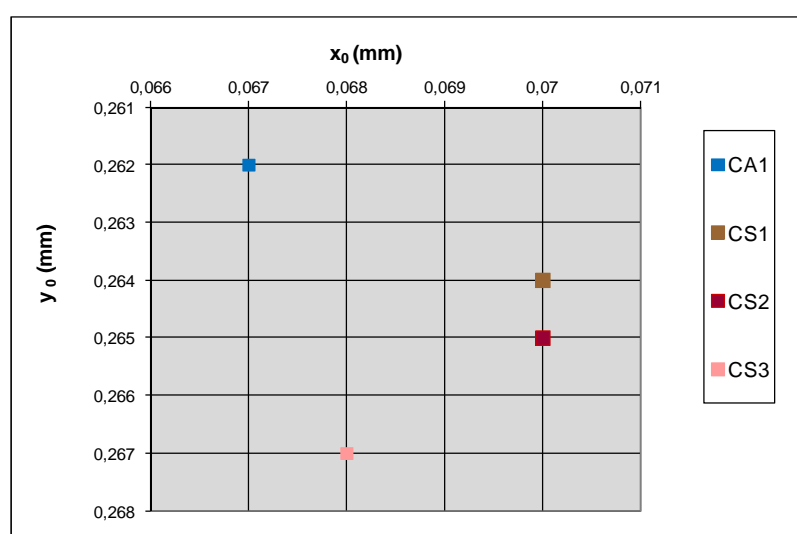


FIGURA 56 - POSIÇÃO DO PP DETERMINADA NA CA1 E NAS CALIBRAÇÕES EM SERVIÇO

A Figura 57 sintetiza as exatidões planimétricas e altimétricas resultantes dos processamentos de calibrações aéreas. Pela análise das exatidões obtidas nos experimentos é possível verificar que o experimento de calibração em serviço com 2 pontos de apoio planialtimétrico (CS3), apresentou exatidões próximas da calibração CA1, que utilizou 13 pontos de apoio planialtimétrico.

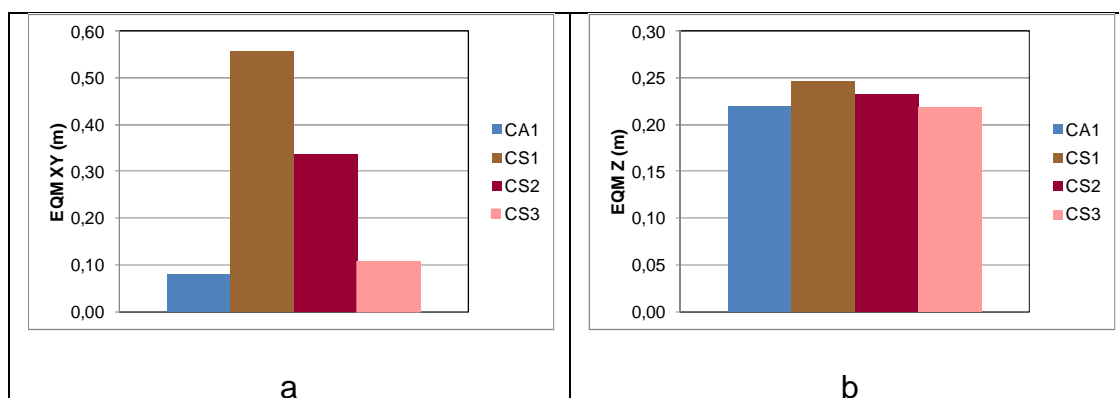


FIGURA 57 - a) EQM PLANIMÉTRICO DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO b) EQM ALTIMÉTRICO DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DOS EXPERIMENTOS CA1, CS1, CS2 E CS3

Pela análise da Figura 58 pode-se verificar que, com a adição de pontos altimétricos do LIDAR (experimentos CS3), as exatidões planialtimétricas obtidas são muito superiores do que as exatidões alcançadas no experimento CA6, no qual foram empregados somente estes 2 pontos de apoio planialtimétricos.

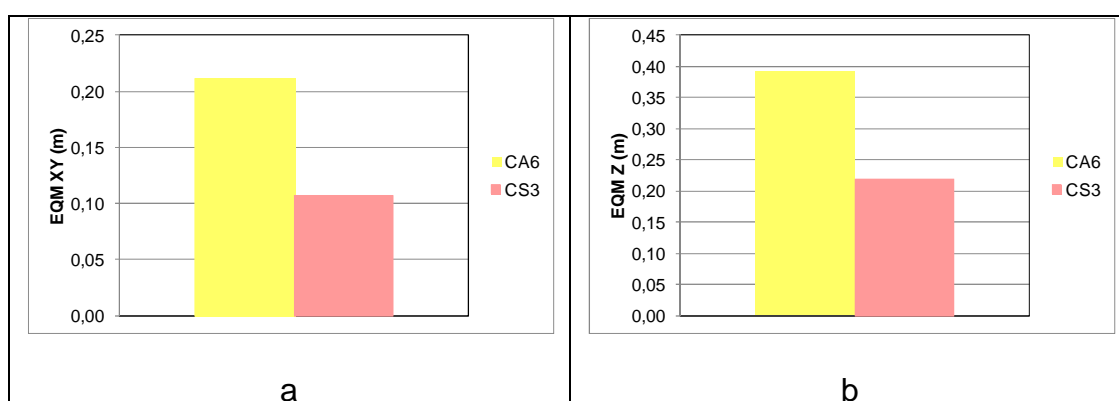


FIGURA 58 - a) EQM PLANIMÉTRICO DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO b) EQM ALTIMÉTRICO DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DOS EXPERIMENTOS CA6 E CS3

A partir dos resultados apresentados pode-se concluir que a qualidade das coordenadas no espaço objeto obtidas com a metodologia de calibração em serviço com um conjunto denso de pontos de apoio altimétrico LIDAR e dois pontos de apoio planialtimétrico (CS3) foi compatível com o experimento CA1, empregando 13 pontos de apoio planialtimétrico, e superior ao experimento CA6, no qual foram empregados os mesmos 2 pontos de apoio planialtimétrico. Com isso, é possível verificar a exequibilidade da calibração em serviço do bloco utilizado nessa pesquisa, empregando dados do LIDAR em conjunto com um número mínimo de dois pontos de apoio planialtimétrico.

Pelos resultados obtidos nas calibrações CS2 e CS3, que variaram o número e posição de pontos de apoio planialtimétrico no bloco, conclui-se que para blocos com maior número de faixas de voo a calibração em serviço certamente necessitará de maior quantidade de apoio planialtimétrico. Apesar da impossibilidade de experimentos conclusivos, os resultados obtidos apontam para a necessidade de pontos de apoio nos cantos do bloco.

4.6 VALIDAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE CALIBRAÇÃO

A verificação do desempenho dos POI, determinados nas calibrações aéreas e na calibração terrestre, foi realizada pela análise dos resultados obtidos em processamentos de aerotriangulação de um bloco fotogramétrico, obtido em local e época diferente do que foi utilizado nos procedimentos de calibração aérea. Os erros sistemáticos das observações fotogramétricas do bloco de fotografias de Telêmaco Borba foram corrigidos empregando-se os quatro conjuntos de POI determinados nas calibrações aéreas utilizando o campo de prova de Ponta Grossa e os POI determinados com a calibração terrestre. Os resultados dos cinco processamentos de aerotriangulação, empregando as coordenadas do CP da câmara, foram analisados e as exatidões obtidas na reconstrução do espaço objeto comparadas.

A metodologia de calibração em serviço empregando dois pontos de apoio planialtimétrico e pontos de apoio altimétrico foi também realizada para o bloco de Telêmaco Borba com a finalidade de verificar se as exatidões obtidas com as fotografias aéreas de Ponta Grossa são alcançadas em blocos fotogramétricos com diferentes configurações. Nas próximas seções os resultados destas validações são apresentados e discutidos.

4.6.1 Aerotriangulações empregando os POI determinados na calibração terrestre e nas calibrações aéreas

Os processamentos de aerotriangulação, empregando os POI determinados nas quatro calibrações aéreas e na calibração terrestre, foram realizados utilizando o bloco fotogramétrico de Telêmaco Borba. A Figura 59 apresenta os 2 pontos de apoio planialtimétrico, os 29 pontos de verificação e os 48 pontos fotogramétricos de

passagem utilizados nos processamentos de aerotriangulação. Todos os pontos empregados consistem em detalhes fotoidentificáveis, tais como marcas de sinalização de trânsito. As coordenadas do CP da câmara foram injuncionadas em todos os experimentos realizados. Empregando o software LPS, as medidas dos pontos fotogramétricos foram realizadas por processo manual monoscópico.

A melhor configuração de pontos de apoio planialtimétrico utilizada nas calibrações em serviço já realizadas (dois pontos de apoio planialtimétrico nos extremos do bloco) foi utilizada nos experimentos de validação realizados nesta seção. Esta distribuição de pontos de apoio planialtimétrico foi padronizada para facilitar as análises e as comparações dos resultados e ainda, por este bloco possuir configurações muito similares à existente no bloco de Ponta Grossa (campo de prova).

Foi adotada como precisão das fotocoordenadas o valor de $1/2$ pixel, ou seja 0,004 mm. A precisão adotada para os pontos de apoio foi de 0,03 m, a precisão adotada para as coordenadas do CP da câmara foi de 0,10 m e o valor adotado como variância *a priori* foi o valor unitário.

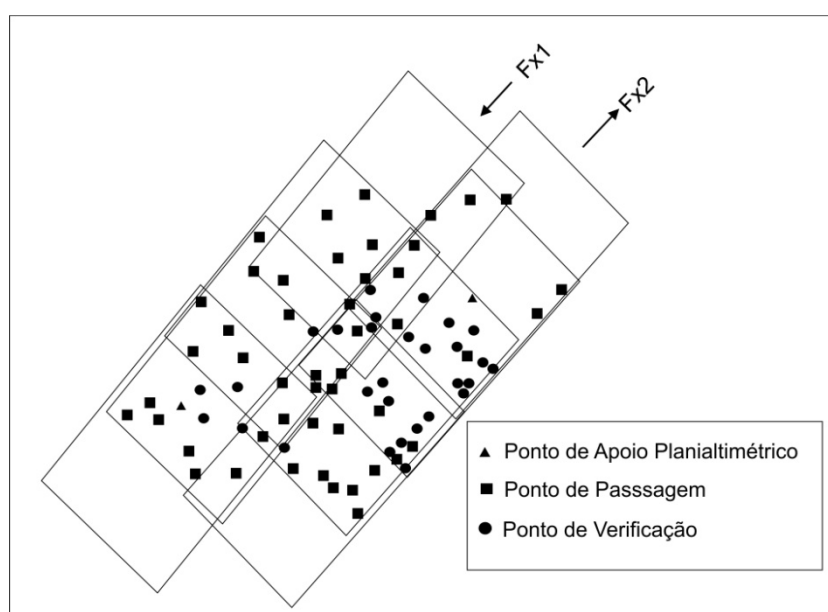


FIGURA 59 - DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE APOIO E VERIFICAÇÃO UTILIZADOS NOS PROCESSAMENTOS DE AEROTRIANGULAÇÃO DO BLOCO DE TELÊMACO BORBA
FONTE: O autor (2011)

4.6.1.1 Aerotriangulação utilizando POI determinados na calibração terrestre

Na Tabela 82 são apresentados os resultados do ajustamento da aerotriangulação, na qual os erros sistemáticos das observações fotogramétricas foram corrigidos empregando os POI determinados na CT. O resultado do teste global para verificar a igualdade entre as variâncias *a priori* e *a posteriori* demonstra a um nível de significância de 5 % que as precisões obtidas no ajustamento não são compatíveis com as admitidas no processo. Entretanto, se for considerado somente os EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio e os EQM dos resíduos das fotocoordenadas verifica-se que os valores obtidos encontram-se dentro das precisões toleráveis. Por outro lado, ao se analisar os EQM dos resíduos das coordenadas do CP, verifica-se que o valor em Z_0 encontra-se acima da precisão de 0,10 m admitida no processo. De forma geral, os resultados das precisões obtidas mostraram a existência de problemas no ajustamento que podem estar relacionados com as exatidões das coordenadas dos CP ou com a capacidade dos POI da CT modelar os afastamentos da condição de colinearidade nas observações fotogramétricas realizadas.

TABELA 82 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA AEROTRIANGULAÇÃO COM POI DA CALIBRAÇÃO TERRESTRE

EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio e CPs					
EQM X (m)	EQM Y (m)	EQM Z (m)	EQM X_0 (m)	EQM Y_0 (m)	EQM Z_0 (m)
0,030	0,014	0,020	0,028	0,034	0,139
EQM dos resíduos das fotocoordenadas e Teste Global					
EQM x (mm)	EQM y (mm)	gl	$\hat{\sigma}_0^2$	χ_a^2	$\chi_{(gl, 1-\alpha)}^2$
0,004	0,003	221	1,831	404,651	256,680

Para a verificação da exatidão obtida neste processamento de aerotriangulação foram utilizados os 29 pontos de verificação mostrados na Figura 59. A Tabela 83 apresenta a média das discrepâncias dos pontos de verificação e os EQM planimétrico e altimétrico.

TABELA 83 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA AEROTRIANGULAÇÃO COM POI DA CT

Discrepância Planimétrica		Discrepância Altimétrica	
Média (m)	EQM (m)	Média (m)	EQM (m)
0,332	0,363	4,531	4,549

Considerando os EQM planimétrico e altimétrico dos pontos de verificação obtidos neste processamento, observa-se que estes valores são superiores aos valores de exatidão admitidos como referência nesta pesquisa.

As discrepâncias planimétricas apresentadas na Figura 60 confirmam que a exatidão planimétrica obtida na aerotriangulação encontra-se pior que 1 GSD. Verifica-se ainda uma tendência positiva de aproximadamente de 1 GSD, tanto para a direção norte como para leste. As imprecisões nas coordenadas dos CP podem ser consideradas como sendo a provável causa dessa tendência, pois mesmo a utilização de 2 pontos de apoio nos extremos do bloco não viabilizou a atenuação do efeito.

Na Figura 61 são apresentadas as discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação. Verifica-se além de uma acentuada tendência uma baixa exatidão na determinação altimétrica no processamento de aerotriangulação. Esses resultados podem ser considerados como sendo esperados, pois nas calibrações realizadas foram verificadas possíveis causas de variabilidade da distância focal determinada na calibração aérea em relação à terrestre, tais como as imprecisões nas coordenadas Z_0 do CP e variações dos índices de refração atmosférica (refração fotogramétrica).

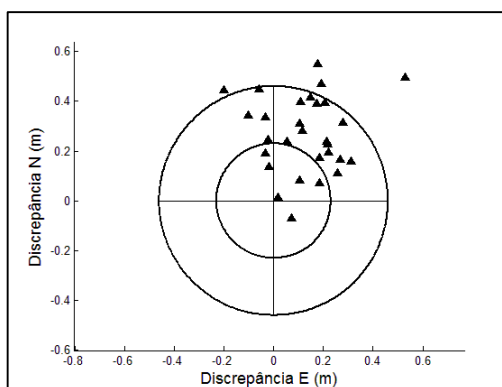


FIGURA 60 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA AEROTRIANGULAÇÃO COM POI DA CT

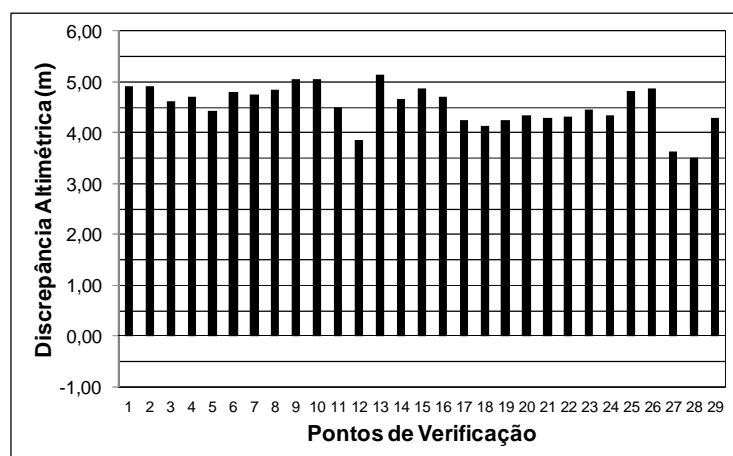


FIGURA 61 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA AEROTRIANGULAÇÃO COM POI DA CT

De forma geral, pode-se concluir que as inexactidões planimétrica e altimétrica devem estar associadas às distintas condições ambientais entre os instantes de tomada das imagens da calibração terrestre e o da coleta das imagens aéreas; e ainda a imprecisões nas coordenadas do CP. Além disso, podem ser consideradas possíveis variações da geometria interna da câmara (câmara de baixo custo), pois existe um intervalo de aproximadamente 1 ano entre a tomada das imagens da calibração terrestre e o aerolevantamento.

4.6.1.2 Aerotriangulações utilizando POI determinados nas calibrações aéreas

Na seção anterior foi verificada a baixa exatidão na aerotriangulação com a utilização de POI provenientes de uma calibração terrestre independente. Nessa seção foi verificado o comportamento da aerotriangulação com a utilização de POI determinados na calibração aérea com imagens adquiridas do sistema fotogramétrico com base num campo de prova. A desvantagem do experimento, como já mencionada, encontra-se na condição das imagens utilizadas terem sido adquiridas numa data anterior à calibração aérea. Entretanto, esta era a única condição disponível no LACTEC para a realização dessa pesquisa.

Empregando-se os POI determinados nas quatro calibrações aéreas utilizando pontos de apoio planialtimétrico do campo de prova de Ponta Grossa (CA1 a CA4), foram realizados experimentos de aerotriangulação do bloco de Telêmaco Borba com pré-correção dos erros sistemáticos nas medidas.

Na Tabela 84 são apresentados os resultados dos ajustamentos das quatro aerotriangulações realizadas. O teste global com base nas variâncias *a priori* e *a posteriori* e os EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio, CP e fotocoordenadas, provenientes de cada aerotriangulação permitem concluir que as precisões obtidas nos ajustamentos podem ser estatisticamente aceitas; ou que independente da metodologia de calibração aérea empregada, os resultados de precisão da aerotriangulação não apresentaram variações significativas. Comparando-se esses resultados com o obtido na aerotriangulação com POI da CT, verifica-se uma melhora na precisão com o uso de POI das CA.

TABELA 84 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DOS PROCESSAMENTOS DE AEROTRIANGULAÇÃO COM POI DAS CA

Calibração	EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio e CPs					
Aérea	EQM X (m)	EQM Y (m)	EQM Z (m)	EQM X ₀ (m)	EQM Y ₀ (m)	EQM Z ₀ (m)
CA1	0,007	0,003	0,005	0,015	0,026	0,067
CA2	0,008	0,003	0,005	0,016	0,025	0,059
CA3	0,009	0,004	0,005	0,018	0,027	0,074
CA4	0,009	0,004	0,005	0,017	0,027	0,073
Calibração	EQM dos resíduos das fotocoordenadas e Teste Global					
Aérea	EQM x (mm)	EQM y (mm)	gl	$\hat{\sigma}_0^2$	χ_a^2	$\chi_{(gl, 1-\alpha)}^2$
CA1	0,003	0,003	221	0,968	213,928	256,680
CA2	0,003	0,003	221	0,983	217,243	256,680
CA3	0,003	0,003	221	0,948	209,508	256,680
CA4	0,003	0,003	221	0,984	217,464	256,680

A verificação da exatidão obtida na reconstrução do espaço objeto pelos processamentos de aerotriangulação foi realizada utilizando os 29 pontos de verificação conforme mostrado na Figura 59. As médias das discrepâncias e os EQM destes pontos de verificação são apresentados na Tabela 85.

TABELA 85 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NOS PROCESSAMENTOS DE AEROTRIANGULAÇÃO COM POI DAS CA

Calibração	Discrepância Planimétrica		Discrepância Altimétrica	
Aérea	Média (m)	EQM (m)	Média (m)	EQM (m)
CA1	0,209	0,239	1,016	1,051
CA2	0,212	0,242	1,050	1,091
CA3	0,218	0,248	1,176	1,208
CA4	0,218	0,249	1,138	1,176

Ao se analisar a Tabela 85, verifica-se de forma geral uma similaridade entre os EQM planimétrico e altimétrico determinados nos diferentes experimentos de

aerotriangulação. As Figuras 62 e 63, mostrando o comportamento das discrepâncias planimétricas e altimétricas, confirmam que as exatidões obtidas nos experimentos de aerotriangulação podem ser consideradas como sendo iguais. A pequena variabilidade dos POI nas calibrações não alteraram as exatidões do processo. Esses resultados podem ser considerados como imprevistos, pois a atenuação de correlações entre POI e POE nas calibrações CA2 e CA4 indicam a determinação de POI mais confiáveis. Entretanto, mesmo nessas calibrações as variações de exatidões não podem ser consideradas como significativamente superiores.

Se forem classificados os valores dos EQM planimétrico e altimétrico obtidos nos experimentos de aerotriangulação, verifica-se que os POI determinados na CA1 permitiram as maiores exatidões. Contudo, essa calibração foi a que apresentou o maior valor de correlação entre ω e y_0 (0,919). De forma geral, as variações de exatidões nos quatro experimentos realizados são pequenas, permitindo a conclusão de serem os quatro conjuntos de POI iguais para a realização dos experimentos.

Comparando-se os resultados obtidos entre as aerotriangulações empregando POI da CT e da CA, verifica-se no caso aéreo um aumento considerável de exatidão. A exatidão planimétrica aproximou-se de 1 GSD e a tendência foi praticamente eliminada. No caso altimétrico, a exatidão foi aproximadamente 4 vezes melhor. Os resultados evidenciam a importância da calibração aérea no processo. Entretanto, se estes resultados fossem comparados com as exatidões obtidas nas calibrações em serviço, verifica-se que as exatidões obtidas nas aerotriangulações com POI da CA são inferiores. As exatidões planimétrica e altimétrica foram, respectivamente, duas e 5 vezes piores que as obtidas na calibração em serviço (por exemplo, a CS3).

Pela Figura 63, é facilmente verificada a existência de tendência e exatidão altimétrica abaixo do valor tolerável de 0,64 m. Esses resultados confirmam as conclusões apresentadas por Mitishita *et al.* (2011), que no caso de aerotriangulações com injunções nos CP, a exatidão vertical é mais dependente da exatidão dos POI do que a exatidão planimétrica.

Conclui-se que mesmo com o processamento de aerotriangulação empregando os POI das CA não foi possível obter exatidões semelhantes às que

foram obtidas nas calibrações em serviço. Admitindo-se que a câmara não sofreu alterações de sua posição na plataforma LIDAR, surge o questionamento se as imprecisões ocorridas nas aerotriangulações estariam somente relacionadas com as variações atmosféricas na formação da imagem. Entretanto, a câmara foi desmontada para tomadas de imagens no campo de prova terrestre. Assim, a possibilidade de imprecisões nas coordenadas do CP não pode ser descartada. Associado a isso existe o problema do sincronismo de tempo na formação da imagem que também altera a posição do CP das imagens. Destaca-se ainda outro questionamento: se a determinação dos POI na calibração aérea seria capaz de modelar de forma eficiente as imprecisões das coordenadas do CP da câmara. Essas são questões importantes nessa pesquisa que infelizmente não teve uma resposta exata do problema. Novas pesquisas poderão, sem dúvida, elucidar, principalmente a causa da menor exatidão altimétrica na aerotriangulação.

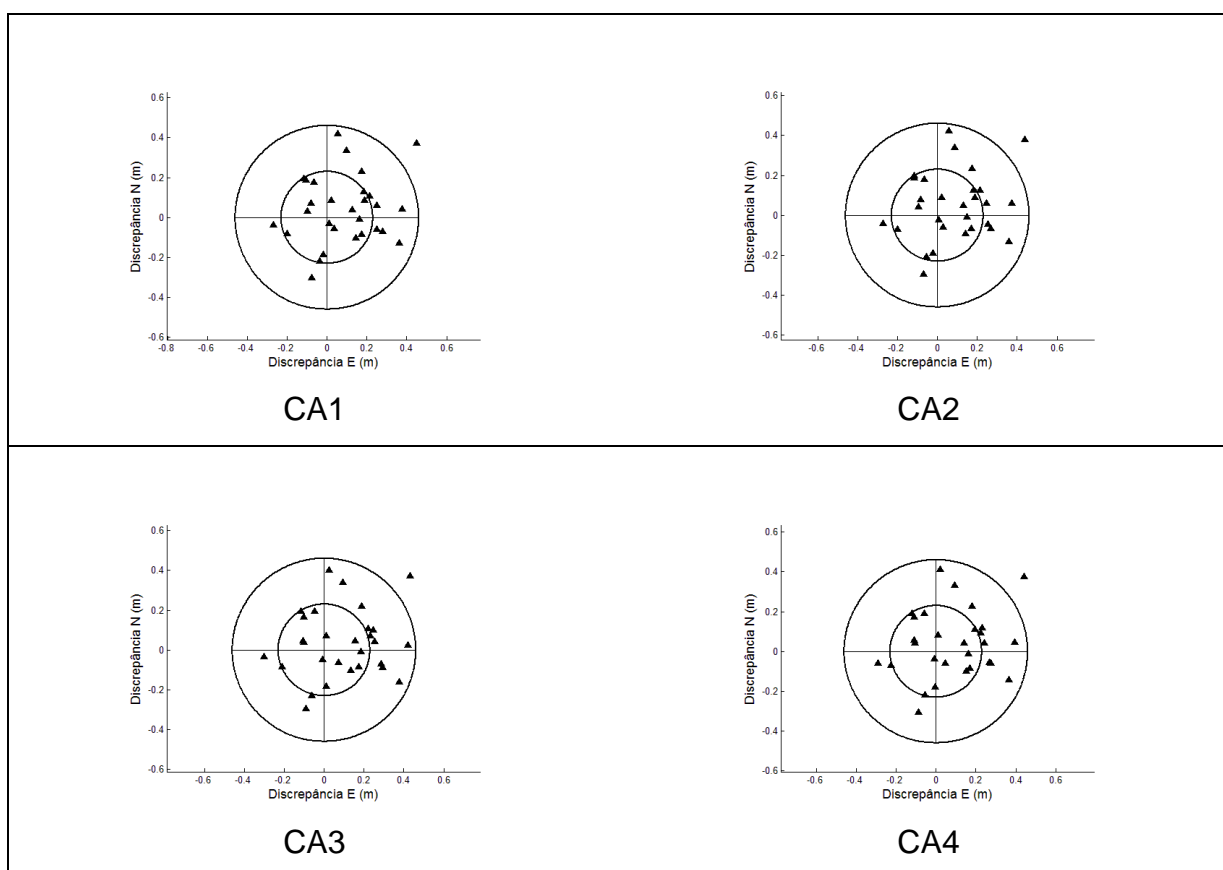


FIGURA 62 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DAS AEROTRIANGULAÇÕES COM POI DAS CA

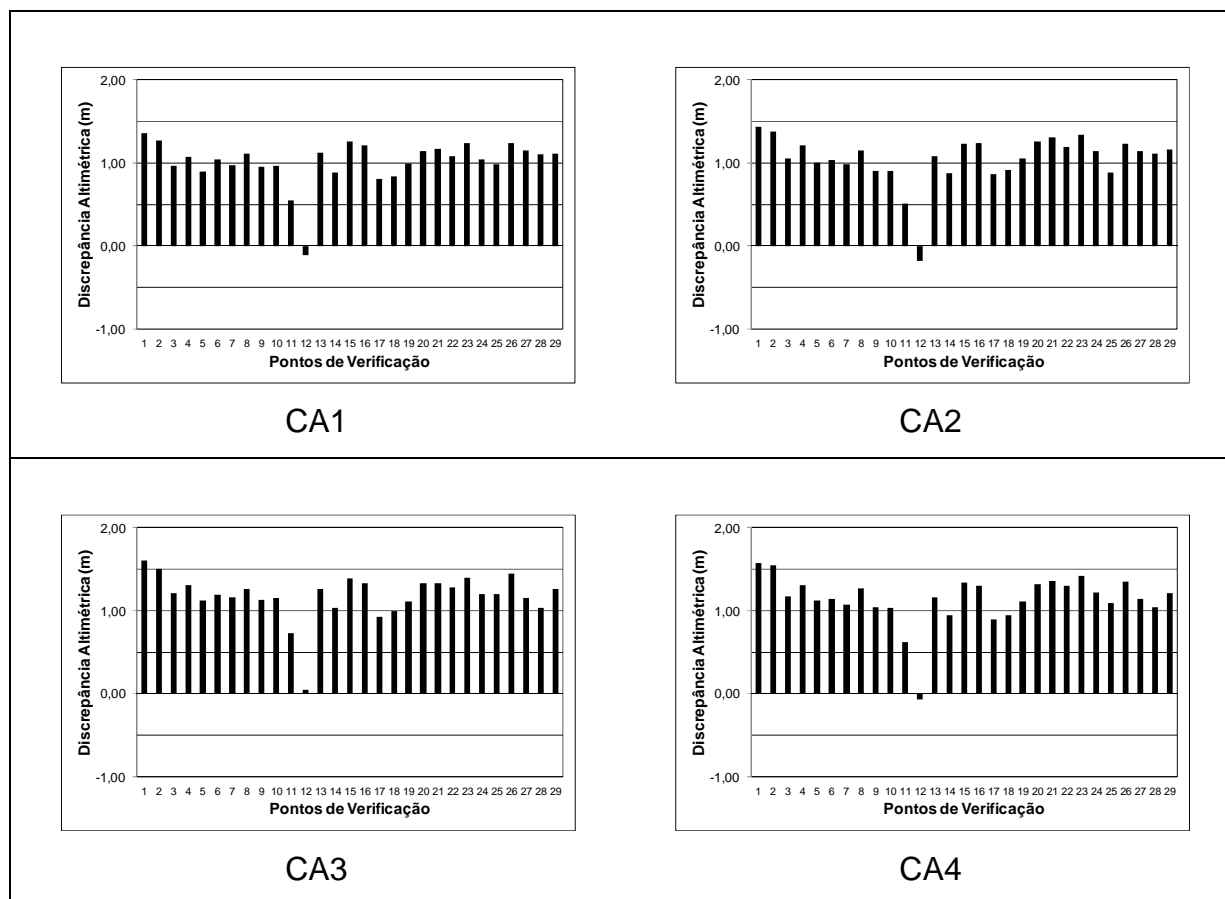


FIGURA 63 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DAS AEROTRIANGULAÇÕES COM POI DAS CA

4.6.2 Calibração em serviço do bloco fotogramétrico de Telêmaco Borba

O experimento foi realizado com a finalidade de confirmar o desempenho da metodologia de calibração em serviço com a utilização de um conjunto denso de pontos de apoio altimétrico LIDAR em conjunto com dois pontos de apoio planialtimétrico. Os dados provenientes do recobrimento aéreo de Telêmaco Borba foram utilizados. As coordenadas altimétricas de 48 pontos de passagem fotoidentificáveis foram extraídas dos dados do levantamento LIDAR, de acordo com a metodologia apresentada na seção 3.2.5.1. Estes pontos fotogramétricos de passagem foram identificados em sua maioria sobre faixas de sinalização de trânsito, de forma a aumentar a exatidão da coordenada altimétrica extraída da nuvem de pontos do levantamento LIDAR. A distribuição desses pontos no bloco é apresentada na Figura 59. Foi adotada como precisão altimétrica destes pontos a precisão nominal de um levantamento LIDAR (0,15 m). Como já mencionado, dois pontos, posicionados nos extremos do bloco (ver Figura 59) foram utilizados. A

precisão adotada no ajustamento para as coordenadas destes dois pontos foi a mesma obtida no levantamento GNSS (0,03 m).

As coordenadas do CP da câmara foram injuncionadas no ajustamento da calibração em serviço, sendo adotada a precisão de 0,10 m. A precisão adotada para as fotocoordenadas foi o valor de 1/2 pixel (0,004 mm). A Tabela 86 apresenta os POI determinados na calibração em serviço do bloco de Telêmaco Borba, denominada de CST.

TABELA 86 - POI DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO DE TELÊMACO BORBA

	f (mm)	σ_f (mm)	x_0 (mm)	σ_{x_0} (mm)	y_0 (mm)	σ_{y_0} (mm)	k_1 (mm ⁻²)	σ_{k_1} (mm ⁻²)	k_2 (mm ⁻⁴)	σ_{k_2} (mm ⁻⁴)
CST	34,281	0,006	0,057	0,005	0,230	0,010	-8,890E-05	1,27E-06	9,870E-08	2,833E-09

A Figura 64 confirma que não existe variação significativa nos parâmetros que modelam a distorção radial simétrica. Em função dessa pequena variabilidade do comportamento da distorção radial simétrica entre os dois recobrimentos é possível inferir na hipótese de ser pequena a influência da refração fotogramétrica nos experimentos de aerotriangulação realizados na seção anterior. No caso de ser a refração fotogramétrica a maior causa de tendência altimétrica nos experimentos, era de se esperar diferenças significativas nos parâmetros de distorção radial simétrica, pois os efeitos são altamente correlacionados. Entretanto, essa hipótese não pode ser totalmente aceita, pois verifica-se na Tabela 88 uma significativa correlação entre os parâmetros de distorção radial e distância focal, mostrando que pode ter havido uma absorção do efeito da refração na determinação da distância focal.

Comparando-se os POI obtidos com os provenientes da calibração aérea CA1, observa-se que a distância focal e as posições do PP variaram significativamente. Pelas análises já realizadas, a hipótese dessas variações serem originadas por imprecisões nas coordenadas do CP da câmara, parece ser a mais provável. Entretanto, as causas de imprecisões nessas coordenadas são difíceis de serem detectadas com os experimentos realizados nessa pesquisa. Como discutido na seção anterior, existem duas prováveis causas: a primeira relacionada com a montagem e desmontagem da câmara no sistema e a segunda com o sincronismo de tempo na formação da imagem. Estudos mais elaborados para a determinação das causas dessas variações não foram contemplados nessa pesquisa.

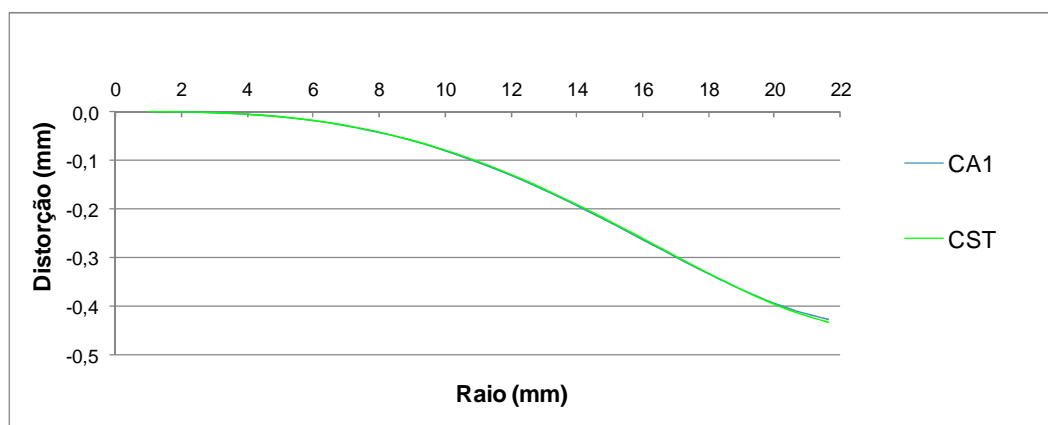


FIGURA 64 - CURVAS DA DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA DA CA1 E CST

Analisando-se as precisões internas da calibração realizada, o teste global realizado pela comparação das variâncias *a priori* com *a posteriori*, apresentado na Tabela 87, foi aceito estatisticamente. Assim, conclui-se que o resultado obtido no ajustamento encontra-se conforme as precisões admitidas para as observações realizadas. Considerando os EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio e das coordenadas do CP da câmara, verifica-se que os valores encontram-se de acordo com as precisões admitidas no processo. Os EQM dos resíduos das fotocoordenadas também são inferiores ao valor de desvio padrão tolerável (0,004 mm). Esses valores permitem concluir que as medidas manuais dos pontos fotogramétricos realizadas no software LPS, encontram-se conforme as precisões admitidas no processo.

TABELA 87 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO DE TELÊMACO BORBA

EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio e CPs					
EQM X (m)	EQM Y (m)	EQM Z (m)	EQM X ₀ (m)	EQM Y ₀ (m)	EQM Z ₀ (m)
0,002	0,002	0,094	0,024	0,026	0,052
EQM dos resíduos das fotocoordenadas e Teste Global					
EQM x (mm)	EQM y (mm)	gl	σ_0^2	χ_a^2	$\chi_{(gl, 1-\alpha)}^2$
0,003	0,003	269	1,072	288,368	308,255

A Tabela 88 apresenta a matriz de correlação dos POI determinados na calibração em serviço. Como visto nas demais calibrações, é possível verificar que os parâmetros de distorção radial simétrica apresentaram alta correlação entre si. E como discutido nas calibrações em serviço com o bloco de Ponta Grossa, a fixação

do referencial do espaço objeto com pontos de apoio ocasiona as correlações entre a distância focal e os parâmetros da distorção radial simétrica.

TABELA 88 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CS DE TELÊMACO BORBA

Matriz de Correlação dos POI					
	f	x_0	y_0	k_1	k_2
f	1,000				
x_0	0,015	1,000			
y_0	-0,051	-0,092	1,000		
k_1	-0,704	0,029	0,064	1,000	
k_2	0,662	-0,059	-0,064	-0,974	1,000

Na Tabela 89 são apresentadas as médias dos coeficientes de correlação entre os POI e os POE. Diferente do bloco de Ponta Grossa, as faixas de voo desse bloco encontram-se inclinadas em relação a direção leste-oeste. Dessa forma, os movimentos angulares, tanto nas direções x como em y (ω e ϕ) apresentaram correlações significativas com a determinação da posição y_0 do PP. Essas correlações são indiretamente relacionadas com os efeitos das injunções nas coordenadas do CP das imagens e com a fixação do referencial no espaço objeto pelos pontos de apoio.

TABELA 89 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE DETERMINADOS NA CS DE TELÊMACO BORBA

Correlação entre POI e POE					
	f	x_0	y_0	k_1	k_2
ω	0,073	0,276	0,776	0,071	0,083
ϕ	0,039	0,379	0,823	0,037	0,027
κ	0,065	0,136	0,203	0,075	0,060
X_0	0,006	0,073	0,035	0,011	0,014
Y_0	0,009	0,077	0,033	0,014	0,016
Z_0	0,105	0,137	0,043	0,036	0,038

A análise da exatidão do processo foi realizada com os 29 pontos de verificação mostrados na Figura 59. A Tabela 90 apresenta a média das discrepâncias dos pontos de verificação e os EQM planimétrico e altimétrico obtidos.

TABELA 90 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CS DE TELÊMACO BORBA

Discrepância Planimétrica		Discrepância Altimétrica	
Média (m)	EQM (m)	Média (m)	EQM (m)
0,171	0,195	-0,051	0,231

Comparando os resultados de exatidões obtidos nessa calibração com os das aerotriangulações com pré-correção dos erros sistemáticos nas medidas verifica-se um incremento considerável, principalmente na exatidão altimétrica. Como já verificado, os valores de POI estão fortemente correlacionados com o recobrimento realizado. Assim, a calibração em serviço permitiu minimizar as imprecisões da determinação das coordenadas dos CP, de sincronização de tempo na formação da imagem e da refração fotogramétrica.

A Figura 65 apresenta a distribuição das discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação. É possível observar que a distribuição não apresentou tendência em relação à origem e que somente um ponto de verificação possui discrepância planimétrica superior a 2 GSD. Um teste estatístico t *Student* com um nível de significância de 5% foi realizado (ver Apêndice 01), confirmando que a distribuição das discrepâncias planimétricas não apresentou tendência.

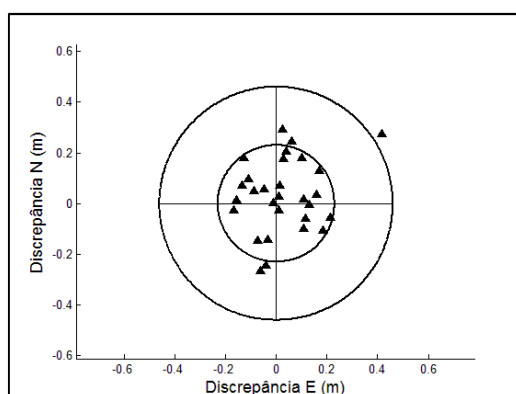


FIGURA 65 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CS DE TELÊMACO BORBA

A Figura 66 apresenta um gráfico com a distribuição das discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação. Pela análise do gráfico pode-se observar que nenhum dos pontos de verificação apresentou discrepância altimétrica superior ao valor esperado de exatidão altimétrica. O teste estatístico t de *Student* com um nível de significância de 5% realizado (Apêndice 01) confirma que estas discrepâncias não apresentaram tendência.

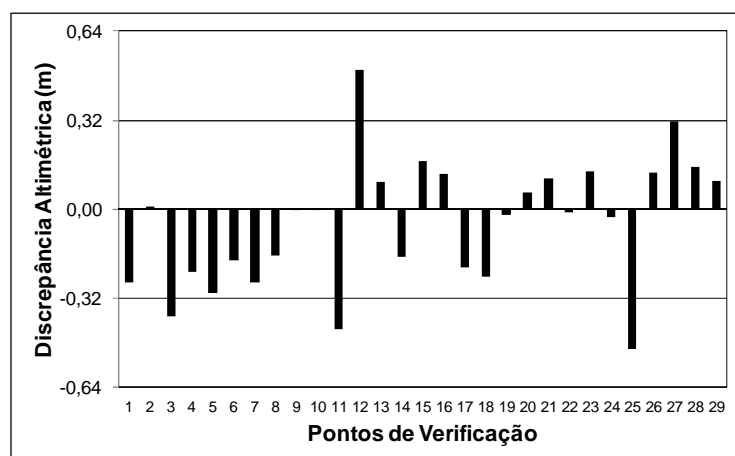


FIGURA 66 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CS DE TELÊMACO BORBA

A verificação da exatidão obtida na calibração em serviço foi realizada através dos testes estatísticos apresentados na Tabela 91. As médias das discrepâncias planimétricas e altimétricas da calibração em serviço foram confrontadas com as exatidões esperadas no processo.

TABELA 91 - TESTES DE HIPÓTESE PARA AS EXATIDÕES OBTIDAS NA CS DE TELÊMACO BORBA

Testes da Exatidão Planimétrica			Testes da Exatidão Altimétrica		
Teste de Normalidade (p valor)	t_{calc}	t_{α}	Teste de Normalidade (p valor)	t_{calc}	t_{α}
0,021	-3,312	1,701	0,0482	-17,137	1,701

Com base no teste de *Shapiro-Wilk* que testa a normalidade das discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação em relação a sua média, verificou-se que estas não se aproximam de uma distribuição normal. Pela análise do resultado do teste não paramétrico de *Wilcoxon* o p valor resultante de 0,998 corrobora com o resultado do teste t de *Student* referente à avaliação da exatidão planimétrica obtida na calibração em serviço, em que verifica-se que o experimento alcançou a exatidão planimétrica esperada. Como o valor calculado para a distribuição t foi menor que o valor tabelado, a hipótese H_0 não foi rejeitada, ou seja, a média das discrepâncias planimétricas resultantes da calibração em serviço pode ser considerada estatisticamente inferior ou igual a 0,23 m.

O teste de normalidade de *Shapiro-Wilk*, realizado para as discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação provou que estas não se aproximam de uma

distribuição normal, pois o p valor do teste é inferior a 0,05. Desta forma, foi aplicado o teste não paramétrico de *Wilcoxon*, cujo o p valor resultante foi de 1. Desta forma, pelo resultado do teste não paramétrico e do teste t realizado a hipótese H_0 não é rejeitada. Com estes resultados pode-se concluir, com um nível de significância de 95%, que a média populacional das discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação da calibração em serviço é igual ou inferior a 0,64 m.

Os resultados obtidos nas calibrações em serviço realizadas com os dados dos recobrimentos aéreos de Telêmaco Borba e de Ponta Grossa permitem concluir que a metodologia proposta de calibração com utilização de pontos altimétricos LIDAR pode ser utilizada para a obtenção de exatidões planimétrica e altimétrica de acordo com os valores tomados como toleráveis nessa pesquisa.

4.6.3 Calibração Aérea do bloco fotogramétrico de Telêmaco Borba com somente dois pontos de apoio altimétrico

O objetivo do experimento foi de mostrar a importância da inclusão dos pontos de apoio altimétrico, derivados dos dados LIDAR, na calibração em serviço da câmara no sistema de imageamento LACTEC. O mesmo bloco de Telêmaco Borba do experimento anterior foi aqui utilizado, com a diferença de que os pontos de passagem deixaram de ser pontos de apoio altimétrico. Na Tabela 92 são apresentados os POI determinados nesta calibração, denominada de CAT.

TABELA 92 - POI DETERMINADOS NA CA DE TELÊMACO BORBA

	f (mm)	σ_f (mm)	x_0 (mm)	σx_0 (mm)	y_0 (mm)	σy_0 (mm)	k_1 (mm ⁻²)	σk_1 (mm ⁻²)	k_2 (mm ⁻⁴)	σk_2 (mm ⁻⁴)
CAT	34,278	0,010	0,061	0,005	0,194	0,021	-8,98E-05	1,31E-06	1,01E-07	2,89E-09

A menos da coordenada y_0 do PP, os POI determinados nessa calibração aérea são similares aos valores determinados na calibração CST (calibração anterior). O valor do parâmetro y_0 é significativamente diferente do que foi obtido na CST e a sua precisão de determinação não é apropriada se for comparada com outras determinações. Analisando-se Tabela 95, verifica-se que houve um acréscimo nos valores dos coeficientes de correlações desse parâmetro com os ângulos de rotação ω e ϕ . Esse acréscimo de correlação justifica a menor precisão na determinação do parâmetro y_0 . O valor do parâmetro y_0 modificou-se

consideravelmente em relação à calibração anterior (CST), pois era esperada pequena alteração dada a similaridade do bloco e a mesma forma de fixação do referencial planimétrico do espaço objeto. A não utilização de pontos de apoio altimétrico permitiu maior liberdade nas rotações das imagens provocando maiores correlações com o parâmetro y_0 do PP. Efeito já verificado nas calibrações realizadas com o bloco de Ponta Grossa, empregando somente dois pontos de apoio (CA6) e utilizando estes dois pontos em conjunto com pontos de apoio altimétrico (CS3). De forma similar, quando foram utilizados pontos de apoio altimétrico, a correlação entre o parâmetro y_0 e ω foi atenuada. Entretanto, nessas calibrações (CA6 e CS3) o valor do parâmetro y_0 e a sua precisão de determinação não sofreram variações significativas. A única diferença que pode justificar a variação significativa do parâmetro y_0 na presente calibração (CAT) é a existência de maior correlação, pois nessa foi verificada correlação com dois ângulos de rotação (ω e ϕ).

Com relação à determinação da distância focal, na Tabela 94 verificam-se que as correlações com os parâmetros de distorção radial simétrica foram minimizadas. Valores esperados, pois o referencial planialtimétrico não foi totalmente fixado com os pontos de apoio.

A Tabela 93 apresenta os EQM resultantes do ajustamento, os graus de liberdade, o sigma *a posteriori* e os valores de qui-quadrado do teste global realizado. Pela análise dos dados apresentados, verifica-se que os resultados obtidos no ajustamento podem ser aceitos estatisticamente para um nível de significância de 5%. Com isso é possível verificar que as observações realizadas encontram-se dentro das precisões admitidas no processo.

TABELA 93 - RESULTADOS DO AJUSTAMENTO DA CA DE TELÊMACO BORBA

EQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio e CPs					
EQM X (m)	EQM Y (m)	EQM Z (m)	EQM X_0 (m)	EQM Y_0 (m)	EQM Z_0 (m)
0,002	0,001	0,001	0,013	0,024	0,047
EQM dos resíduos das fotocoordenadas e Teste Global					
EQM x (mm)	EQM y (mm)	gl	$\hat{\sigma}_0^2$	χ_a^2	$\chi_{(gl, 1-\alpha)}^2$
0,002	0,003	221	0,844	186,524	256,680

TABELA 94 - CORRELAÇÃO ENTRE POI DETERMINADOS NA CA DE TELÊMACO BORBA

Matriz de Correlação dos POI					
	f	x ₀	y ₀	k ₁	k ₂
f	1,000				
x ₀	0,144	1,000			
y ₀	-0,155	-0,147	1,000		
k ₁	-0,265	0,086	0,094	1,000	
k ₂	0,244	-0,128	-0,029	-0,974	1,000

TABELA 95 - MÉDIA DOS MÓDULOS DAS CORRELAÇÕES ENTRE POI E POE DETERMINADOS NA CA DE TELÊMACO BORBA

Correlação entre POI e POE					
	f	x ₀	y ₀	k ₁	k ₂
ω	0,131	0,074	0,937	0,114	0,060
φ	0,175	0,317	0,951	0,062	0,008
κ	0,092	0,115	0,095	0,089	0,075
X ₀	0,009	0,059	0,020	0,012	0,010
Y ₀	0,009	0,062	0,013	0,013	0,014
Z ₀	0,053	0,154	0,043	0,034	0,037

Para a verificação da exatidão obtida nesta calibração aérea foram utilizados os 29 pontos de verificação sinalizados como círculos na Figura 59. A Tabela 96 apresenta a média das discrepâncias dos pontos de verificação e os EQM planimétrico e altimétrico obtidos.

TABELA 96 - DISCREPÂNCIAS E EQM DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NA CA DE TELÊMACO BORBA

Discrepância Planimétrica		Discrepância Altimétrica	
Média (m)	EQM (m)	Média (m)	EQM (m)
0,199	0,225	-0,126	0,377

Pelos resultados apresentados na Tabela 96 verifica-se que o EQM planimétrico e altimétrico dos pontos de verificação são inferiores aos valores estabelecidos como exatidão esperada. Pela Figura 67 e Apêndice 01 observa-se que as discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação não apresentaram tendência.

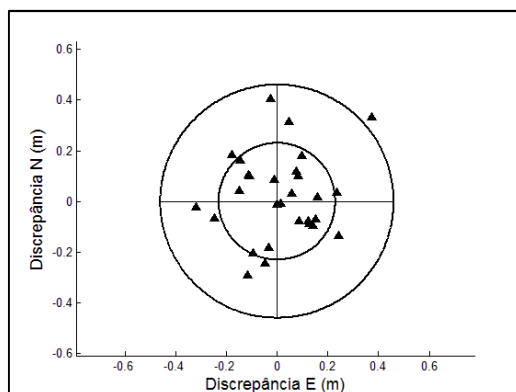


FIGURA 67 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CA DE TELÊMACO BORBA

O gráfico das discrepâncias altimétricas, apresentados na Figura 68, possibilita verificar que somente dois dos pontos de verificação apresentaram discrepância altimétrica acima do valor estabelecido como tolerância (0,64 m). O resultado do teste estatístico t de *Student* mostrou que estas discrepâncias não possuem tendência (Apêndice 01).

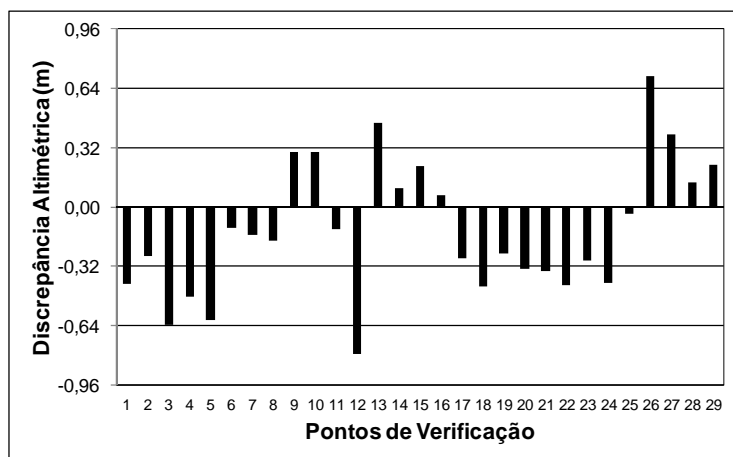


FIGURA 68 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DA CA DE TELÊMACO BORBA

Na Tabela 97 são apresentados os resultados dos testes estatísticos empregados para verificar se a média populacional dos erros planimétricos e das discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação podem ser considerados estatisticamente compatíveis com os valores adotados como exatidões toleráveis. Verifica-se pelos p valores dos testes de normalidade empregados que a distribuição das discrepâncias planimétricas e das discrepâncias altimétricas podem ser consideradas como sendo uma distribuição normal em relação à sua média.

TABELA 97 - TESTES DE HIPÓTESE PARA AS EXATIDÕES OBTIDAS NA CALIBRAÇÃO AÉREA DE TELÊMACO BORBA

Testes da Exatidão Planimétrica			Testes da Exatidão Altimétrica		
Teste de Normalidade (p valor)	t_{calc}	t_{α}	Teste de Normalidade (p valor)	t_{calc}	t_{α}
0,263	-1,545	1,701	0,205	-8,801	1,701

Pelo resultado do teste *t de Student* realizado empregando as discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação pode-se afirmar com 95 % de confiança que a média populacional destes erros é igual ou inferior a 0,23 m. Com base no teste *t de Student* realizado com as discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação pode-se afirmar com 95% de confiança que a média populacional pode ser considerada inferior a 0,64 m.

Apesar do experimento de calibração aérea com dois pontos de apoio planialtimétrico possuir valores de EQM planimétrico e altimétrico compatíveis com os valores de tolerância, as exatidões planimétrica e altimétrica obtidas são inferiores às determinadas na calibração com pontos de apoio altimétrico (CST). Comparando-se a Figuras 65 com a 67, verifica-se facilmente que a calibração com pontos de apoio altimétrico permitiu uma maior exatidão planimétrica, como já visto na calibração realizada com o bloco de Ponta Grossa (CS3). A utilização de pontos de apoio altimétrico no processo melhorou a determinação planimétrica na intersecção fotogramétrica. No caso altimétrico, o incremento de exatidão é notável, pois o EQM é aproximadamente 1,6 vezes menor na calibração com pontos de apoio altimétrico (CST). Estes resultados indicam que a calibração em serviço com pontos de apoio altimétrico, com coordenadas extraídas da nuvem de pontos LIDAR, associados com dois pontos de apoio planialtimétrico deve ser empregada no sistema de imageamento LACTEC quando maiores exatidões planimétricas e altimétricas são requeridas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram apresentadas diferentes metodologias de calibração aérea de uma câmara digital de baixo custo. Os experimentos e análises foram realizados com o objetivo de encontrar uma metodologia de calibração de forma a proporcionar maior exatidão e otimização dos trabalhos fotogramétricos com a configuração de sensores empregados (câmara digital integrada fisicamente com um sistema LIDAR – sistema de imageamento do LACTEC). A integração dos sensores possibilitou a determinação das coordenadas das estações de exposição da câmara para viabilizar os processamentos de calibração, atenuando possíveis correlações entre POI e POE e otimizando o número de pontos de apoio necessários nos processamentos. Duas principais abordagens de calibração aérea foram investigadas: calibração aérea utilizando um campo de prova e calibração em serviço.

Para a realização das calibrações aéreas foi implantado um campo de prova na cidade de Ponta Grossa. A distribuição dos alvos no campo de prova foi realizada com o objetivo de atender as metodologias de calibração aérea com diferentes configurações de bloco fotogramétrico (recobrimento aéreo convencional, recobrimento com o uso de faixas de voo cruzadas e recobrimentos com fotografias tomadas a diferentes alturas de voo). Pontos de verificação foram utilizados para analisar as exatidões planimétricas e altimétricas nos diferentes experimentos de calibração. Concentrou-se ainda, na análise das correlações entre os POI e entre POI e POE obtidas nas calibrações com diferentes configurações de bloco fotogramétrico.

Os resultados das calibrações aéreas com as diferentes configurações de bloco fotogramétrico, utilizando o campo de prova com pontos de apoio planialtimétrico, demonstraram que as exatidões planimétrica e altimétrica foram superiores às admitidas como toleráveis nessa pesquisa. E ainda, os POI determinados nestes experimentos de calibração podem ser considerados como sendo similares.

Considerando a análise da correlação entre os POI verificou-se a existência de correlação entre a distância focal e os parâmetros de distorção radial simétrica

em todas as calibrações em que o referencial planialtimétrico do espaço objeto foi completamente definido com o emprego de pontos de apoio. Foram apontadas como possíveis causas desta correlação imprecisões nas coordenadas do CP e problemas de distorção do raio de luz pela variabilidade dos índices de refração atmosférica. Contudo, os experimentos realizados não permitiram determinar com maior confiabilidade a principal causa deste efeito. Concluiu-se que, nas calibrações onde o referencial planialtimétrico é fixado com pontos de apoio, existe uma acomodação da distância focal e a coordenada Z_0 (dentro de sua precisão) que pode ter refletido em correlações nos parâmetros que modelam a distorção radial simétrica, pois essa é correlacionada com variação da distância focal.

Pelas análises realizadas nos coeficientes de correlação entre POI e POE provenientes das diferentes calibrações verificou-se a existência de correlações entre a coordenada y_0 do PP com ângulos de rotação (ω e ϕ) das imagens, dependendo do sentido do recobrimento. Pode-se concluir que com a utilização de bloco com faixas de voo cruzadas o valor médio da correlação entre y_0 e ω foi atenuado. Estas correlações foram verificadas em todos os experimentos de calibração em que foram empregadas faixas de voo de um recobrimento convencional e pontos de apoio planialtimétrico, inclusive no experimento de calibração utilizando faixas de voo com duas alturas. Com isso, conclui-se que a utilização de faixas com diferentes alturas de voo não proporciona a rigidez geométrica provida pelo emprego de faixas de voo cruzadas. Dessa forma, se for considerado um processo de calibração independente, que visa somente à determinação de POI, conclui-se que a utilização de faixas cruzadas é condição imprescindível para atenuar as correlações entre POI e POE.

A verificação do desempenho dos POI, determinados nas calibrações aéreas, foi realizada através de processamentos de aerotriangulação de um bloco fotogramétrico (utilizando as coordenadas das estações de exposição), obtido em local e época diferente do que foi empregado nos procedimentos de calibração aérea. Parâmetros de orientação interior determinados pelo Método das Câmaras Convergentes, utilizando um campo de prova terrestre, também foram utilizados para a correção de erros sistemáticos das observações fotogramétricas deste bloco de fotografias simplesmente para fins de comparações.

As exatidões obtidas nos processamentos empregando os POI provenientes das calibrações aéreas foram consideravelmente superiores às exatidões obtidas no processamento empregando os POI determinados na calibração terrestre, principalmente no que se refere à exatidão altimétrica. Admitiu-se como a provável causa desta diferença de exatidão altimétrica a variabilidade da distância focal determinada na calibração aérea em relação à terrestre. A partir dos resultados destes experimentos, observou-se que nos processamentos de aerotriangulação, utilizando as estações de exposição das fotografias, a exatidão altimétrica é mais dependente da qualidade dos POI do que a exatidão planimétrica.

Pôde-se verificar também que a utilização dos POI, determinados nas calibrações com diferentes configurações de bloco fotogramétrico, não resultaram em diferenças significativas de exatidão nos processamentos de aerotriangulação, e que não foi possível atingir a exatidão altimétrica admitida como tolerável, demonstrando prováveis imprecisões nas coordenadas do CP da câmara.

Os resultados obtidos nos experimentos de calibração em serviço, empregando a posição do CP da câmara e pontos de apoio altimétrico do LIDAR, demonstraram a viabilidade desta metodologia. Entretanto, para se alcançar a exatidão planimétrica compatível com a obtida em experimentos utilizando pontos de apoio planialtimétrico é necessária a inclusão de ao menos dois pontos de apoio planialtimétrico ao bloco. Os procedimentos de calibração em serviço utilizando somente pontos de apoio altimétrico alcançaram exatidão planimétrica, aproximadamente, igual a dois GSD no terreno. Neste contexto, observou-se uma maior qualidade na reconstrução do espaço objeto quando a calibração em serviço (empregando as estações de exposição) é realizada utilizando pontos de apoio altimétrico, extraídos da nuvem de pontos LIDAR, em conjunto com um número mínimo de dois pontos de apoio planialtimétricos.

Pela comparação dos resultados obtidos nas calibrações que empregaram somente dois pontos de apoio planialtimétrico e naquelas que incluíram os pontos de apoio altimétrico, conclui-se que a utilização do apoio altimétrico proporcionou uma melhora nas exatidões do processo, principalmente na exatidão altimétrica.

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que a metodologia de calibração em serviço com pontos de apoio altimétricos LIDAR em conjunto com dois pontos de apoio planialtimétrico foi a forma de prover maior exatidão aos processos

fotogramétricos realizados com o sistema de imageamento LACTEC (câmara de baixo custo integrada fisicamente com o sistema LIDAR) e configuração de bloco utilizada (voo convencional com duas faixas com sentidos opostos). Os resultados obtidos nos diferentes experimentos, indicam a necessidade de mais pontos de apoio planialtimétrico nos cantos do bloco, no caso de maior número de faixas. Entretanto, experimentos conclusivos para confirmação dessa indicação não foram realizados nessa pesquisa. Apesar disso, a metodologia proposta é relevante, pois a câmara poderá ser calibrada toda vez que um recobrimento aéreo for realizado, possibilitando estudos de instabilidade da câmara de baixo custo.

Os resultados obtidos nesta pesquisa não devem ser generalizados para diferentes câmaras de baixo custo, integradas com sistemas LIDAR, pois todos os experimentos realizados encontram-se fundamentados no sistema de imageamento LACTEC.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento deste trabalho foram verificados alguns aspectos que podem ser desenvolvidos e analisados em trabalhos futuros nesta mesma linha de pesquisa:

- realização de experimentos de calibração em serviço, empregando as coordenadas do CP e pontos de apoio altimétrico extraídos da nuvem de pontos *laser*, utilizando blocos fotogramétricos com maior número de faixas de voo, de forma a viabilizar estudos sobre o número e a distribuição de pontos de apoio planialtimétrico necessários para obter as exatidões requeridas;
- estudos visando a determinação das causas de imprecisões nas coordenadas do CP da câmara no Sistema de Imageamento LACTEC;
- determinação dos parâmetros de orientação da câmara via integração LIDAR e a sua utilização para a realização de experimentos de calibração em serviço com somente informações LIDAR;
- realização de processamentos de aerotriangulação, utilizando POI determinados pelas metodologias de calibração aérea, com um bloco de imagens tomadas em data posterior à data de aquisição das imagens do campo de prova.

REFERÊNCIAS

- AGUILERA, D. G.; GONZÁLVES, P. R.; LAHOZ, J. G. Automatic co-registration of terrestrial Laser Scanner and Digital camera for the generation of Hybrids Models. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing** v. XXXVI, pt. 3/ W52, Espoo, p. 162 - 168, 2007.
- ALBERTZ, J.; KREILING, W. **Photogrammetric Guide**. Karlsruhe: Wichmann, 1980.
- ALTM 2050 Airbone Laser Terrain Mapper The Ultimate in Performance Disponível em < http://www.nts-info.com/inventory/images/ALTM_2050Optech.Ref702.pdf> Acesso em: 30/05/2010.
- ANDRADE, J.B. **Fotogrametria**. 2. ed. Curitiba: SBEE, 2003. 256 f.
- ANDRADE, J.B.; OLIVAS, M.A.A. Calibração de câmaras aerofotogramétricas. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.1, n. 26, p. 01 - 40, 1981.
- BALTSAVIAS, E.P. A comparison between Photogrammetry and Laser Scanning. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 54, p. 83 - 94, 1999.
- BÄUMKER, M.; HEIMES, F.J. New calibration and computing method for direct georeferencing of image and scanner data using the position and angular of an hibrid inertial navigation system. **Integrated Sensor Orientation**, OEEPE Official Publication, n. 43, p.197 - 212, Farnkfurt, 2002.
- BAZAN, W.S.; TOMMASELLI, A.M.G.; GALO, M.; RUY, R.S. Calibração de um sistema dual de câmaras digitais convergentes. **II Simpósio Brasileiro de Geomática V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas** Presidente Prudente, 2007.
- BROWN, D. Close range camera calibration, **Photogrammetric Engineering**, v. 37 n. 8, p. 855 - 866, 1971.
- CLARKE, T. A.; FRYER, J. G. The development of camera calibration methods and models **Photogrammetric Record**, v. 16 n. 91, p. 51 - 66, abr. 1998.

CÔRTEZ, J. B. R. **Análise da estabilidade geométrica de câmaras digitais de baixo custo com diferentes métodos de calibração**. 141 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

CRAMER, M.; STALLMAN, D. On the use of GPS/inertial exterior orientation parameters in airborne photogrammetry. **III International Symposium on mobile mapping technology**, Cairo, 2001.

CRAMER, M. Performance of medium format digital aerial sensor systems. **XX International Symposium Photogrammetry and Remote Sensing**, Proceedings of XXth ISPRS Congress Istanbul: ISPRS, p. 769 - 775, 2004.

CRAMER, M. **Digital Camera Calibration**. EuroSDR, 2009. 262 f.

CRONK, S.; FRASER, C.; HANLEY, H. Automated calibration of colour digital cameras. **Photogrammetric Record**, v. 21 n. 116, p. 355 - 372, dez. 2006.

DALGAARD, P. **Introductory statistics with R**. 2 ed. New York: Springer, 2008. 363 f.

DALMOLIN, Q.; SANTOS, D.R. **Sistema Laserscanner: conceitos e princípios de funcionamento**. 3. ed. Curitiba: UFPR, 2004. 97 f.

FORLANI, G., NARDINOCCHI, C. Adaptive filtering of aerial Laser Scanning data. **ISPRS Workshop on Laser Scanning and SilverLaser**, v. XXXVI, pt. 3/W52, p.130 - 135, Espoo, 2007.

GALO, M.; TOMMASELLI, A. M. G. Calibração de Câmaras. In: PITERI, M. A., RODRIGUES, J. C. (Ed.). **Fundamentos de visão computacional**. Presidente Prudente: FCT/UNESP-PP, 2011. p. 53 - 112.

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**. Curitiba: UFPR, 1994. 314 f.

HABIB, A. F.; MORGAN, M.; LEE, Y. Bundle Adjustment with self calibration using straight lines. **Photogrammetric Record**, v. 17, n. 100, p. 635 - 650, out. 2002.

HABIB, A.; MORGAN, M. Automatic calibration of low cost digital cameras. **Journal of Optical Engineering**, v. 42, n. 4, p. 948 - 955, abr. 2003.

HABIB, A. F.; PULLIVELLI, M.; MORGAN, M. Quantitative measures for the evaluation of camera stability. **XX International Symposium Photogrammetry and Remote Sensing**, Istanbul, TS WG I/2 Sensor Calibration and Testing, p. 63 - 70, jul. 2004.

HABIB, A.; GHANMA, M.; MORGAN, M.; AL-RUZOUQ, R. Photogrammetry and LIDAR data Registration using Linar Features. **Photogrammetry Engineering and Remote Sensing**. v. 71, n. 6, p. 699 - 707, 2005.

HABIB, A.; PULLIVELLI, A.; MITISHITA, E.A.; GHANMA, M.; KIM, E.M. Stability analysis of low-cost digital cameras for aerial mapping using different georeferencing techniques. **The Photogrammetric Record**. v.21, n. 113, p. 29 - 43, 2006.

HABIB, A.; JARVIS, A.; DETCHEV, G.; STENSAAS, D.; MOE, D.; CHRISTOPHERSON, J. Standards and specifications for the calibration and stability of amateur digital camaras for close-range mapping applications. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XXXVII pt. B1, Beijin, 2008.

HONKAVAARA, E.; AHOKAS, E.; JAAKKOLA,J.; HYYPPÄ, J.; ILVES, R.; VILHOMAA,J. Investigations on system calibration of GPS/IMU and camera for direct georrederecing. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XXXIV pt. B3, p. 85 - 89, Austria, 2002.

HONKAVAARA, E. **Calibrating digital photogrammetric airborne imaging systems using a test field**. 62 f. Tese (doutorado em Ciência de Tecnologia) - Department of Surveying, Helsinki University of Technology, Finlândia, 2008.
Disponível em:
<<http://lib.tkk.fi/Diss/2008/isbn9789517112765/isbn9789517112765.pdf>>. Acesso em 20/04/2009.

HONKAVAARA, E.; PELTONIEMI, J.; AHOKAS, E.; KUITTINEN, R.; HYYPPÄ, J.; JAAKKOLA,J.; KAARTINEN, H.; MARKELIN, L.; NURMINEN, K.; SUOMALAINEN, J. A permanent test field for digital photogrammetric systems. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 74, n. 1, p. 95 - 106, jan. 2008.

INTEGRATED Land Management Bureau, **Small and medium format digital camera specifications**, Canadá, 2007. 48 f.

IP, A.W.L. **Analysis of integrated sensor orientation for aerial mapping**. 181 f. Dissertação (Master of Science) - Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Canadá, 2005. Disponível em: <http://www.ucalgary.ca/engo_webdocs/NES/05.20204_AlanIp.pdf>. Acesso em 18/04/2009.

ISENBURG, M. LASTools - efficient tools for LiDAR processing. version 111216. Disponível em <<http://lastools.org>>. Acesso em: 01/06/2011.

JACOBSEN, K. Issues and method for in-flight and on-orbit calibration. **Workshop on radiometric and Geometric Calibration**, Gulfport, 2003.

JAMES, T. D.; MURRAY, T.; BARRAND, N.; BARR, S. L. Extracting photogrammetric ground control from lidar DEMs for change detection. **The Photogrammetric Record**, v. 21, n. 116, p. 312 - 328, dec. 2006.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento Remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução de: NEVES, E. FORMAGGIO, A.R.; SANTOS, A.R.; RUDORFF, B.F.T.; ALMEIDA, C.M.; GALVÃO, L.S. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese. 2009.

JOINT Committee for Guides in Metrology, **Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais e termos associados**. Tradução de: INMETRO. 1. ed. Rio de Janeiro, 2009.

JUBANSKI, J.; ALIXANDRINI, M.; BÄHR, H.P. Câmeras aerofotogramétricas digitais: novos conceitos e normas. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 61/01, p. 51 - 66, 2009.

KERN F. Supplementing Laserscanner Geometric Data with Photogrammetric Images for Modeling. **International Symposion CIPA**, p. 454 - 461, 2001.

KERSTING, A.P.B. Quality Assurance of Multi-Sensor Systems. 295 f. Tese (Doctor of Philosophy) - Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Canadá, 2011. Disponível em: <http://www.ucalgary.ca/engo_webdocs/AH/11.20346_AnaKersting.pdf >. Acesso em 02/06/2012.

KRESSE, W. Development of an international standard for calibration and validation of remote sensing imagery sensors and data. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. XXXVIII, pt. 1 / WG I/3, Calgary, 2010.

KODAK Professional DCS Pro SLR/c in depth review. Disponível em <<http://www.dpreview.com/reviews/kodakslrc/>>. Acesso em: 30/05/2010.

LERMA, J.L.; CABRELLES, M. A review and analyses of plumb-line calibration. **Photogrammetric Record**. v. 22, n. 118, p.135 - 150, jun. 2007.

LIMA, S.R.S. **Integração de sensores GPS/INS utilizando sensores inerciais baseados em sistemas microeletromecânicos (MEMS)**. 158 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. Disponível em <<http://hdl.handle.net/1884/2351>>. Acesso em: 28/04/2009.

MACHADO, A.M.L. **Extração automática de contornos de edificações utilizando imagem gerada por câmara digital de pequeno formato e dados LIDAR**. 213 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

MARQUES FILHO, E.A. **Navegação através de um sistema integrado GPS-INS baseado em IMU não-giroscópia**. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica Espacial e Controle) INPE, São José dos Campos, 2007. Disponível em <http://www.inpe.br/pos_graduacao/index.php>. Acesso em: 07/05/2009.

MARTINS, M. A.R. **Geração de Ortoimagens a partir de georreferenciamento direto de imagens digitais aéreas de pequeno formato com dados LIDAR**. 131 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

MENDONÇA JR., M.G. **Reconstrução de edificações para a geração de ortimagens verdadeiras com emprego de dados Lidar**. 238 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

MERCHANT, D.C. **Analytical Photogrammetry: Theory and Practice Parte I**. The Ohio State University, 1979.

MERCHANT, D.C. **Analytical Photogrammetry: Theory and Practice Parte II.** The Ohio State University, 1980.

MIKHAIL, E.M.; BETHEL, J.; McGLONE, J.C. **Introduction to modern photogrammetry.** Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2001. 479 f.

MITISHITA, E.A.; OLIVAS, M.A.A. Calibração de câmaras aerofotogramétricas a partir de aerofotos digitalizadas. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.7, n. 1, p. 64 - 76, jan./mar. 2001.

MITISHITA, E.A.; HABIB, A.; CENTENO, J.; MACHADO, A.; LAY, J.; WONG, C. Photogrammetric and lidar data integration using the centroid of a rectangular roof as a control point. **The Photogrammetric Record**, v. 23, n. 121, p. 19 - 35, mar. 2008.

MITISHITA, E.A.; CÔRTEZ, J.; CENTENO, J.; MACHADO, A. M.L. Small-format digital camera: a study into stability analysis of the interior orientation parameters through temperature variation. **MMT09 6th International Symposium on Mobile Mapping Technology**, Presidente Prudente, 2009.

MITISHITA, E.A.; CÔRTEZ, J.; CENTENO, J.; MACHADO, A.M.L.; MARTINS, M. Study of stability analysis of the interior orientation parameters from the small-format digital camera using on-the-job calibration. **Canadian Geomatics Conference**. Calgary, 2010.

MITISHITA, E.A.; CÔRTEZ, J.; CENTENO, J. Indirect georeferencing of digital SLR imagery using signalised LIDAR control points. **The Photogrammetric Record**, v. 26, n. 133, p. 58 - 72, mar. 2011.

MOSTAFA, M.M.R.; HUTTON, J. Direct Positioning and orientation systems How do they work? What is the attainable accuracy? **Proceeding American Society of Photogrammetry and Remote Sensing Annual Meeting**, St. Louis, abr. 2001.

NARDINOCCHI, C.; FORLANI, G.; ZINGARETTI, P. .Classification and filtering of Laser data. In: **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. XXXIV, pt. 3, 2003.

NOVAK, K. **Analytical Photogrammetry.** Department of Geodetic Science and Surveying. Columbus: Ohio State University, 1991.

PETRIE, G. Airbone digital frame cameras. **Geoinformatics**, v.7, n. 6, p. 18 - 27, out./nov., 2003.

PETRIE, G., WALKER, A.S. Airbone Digital imaging technology: a new overview. **The Photogrammetric Record**, v. 22, n. 119, p. 203 - 225, set. 2007.

REMONDINO, F.; FRASER, C. Digital camera calibration methods considerations and comparisons. In: **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. XXXVI, pt. 5, 2006.

RÖNNHOLM, R.; HONKAVAARA, E.; LITKEY, P.; HYYPPÄ, H.; HYYPPÄ J. Integration of Laser Scanning and Photogrammetry. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. XXXVI, pt. 3 / W52, Espoo, p. 355 - 362, 2007.

RUY, R.S. **Desenvolvimento e validação geométrica de um sistema para mapeamento com câmaras digitais de médio formato**. 229 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2008.

R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Viena, 2009. Disponível em <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 20/12/2011.

SANTOS, D.R. **Automação da resseção espacial de imagens com uso de hipóteses de rodovias como apoio de campo derivadas do sistema de varredura laser**. 187 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

SANTOS, D.R.; POZ, A.P.D.; DALMOLIN, Q.; CARLETTO, R.D.B. Extracting control points from LIDAR and photogrammetry data integration for indirect orientation of images. **The Photogrammetric Journal of Finland**, v. 22, p. 10 - 30, 2010.

SCHWARZ, K.P., FRASER, C.S, GUSTAFSON, P.C. Aerotriangulation without ground control. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. XXV/A1, p. 237 - 250, Rio de Janeiro, 1984.

SCHENK, T.; CSATHO, B. Fusion of LIDAR data and Aerial Imagery for a more complete surface description. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. XXXIV/A, p. 310 - 317, 2002.

SHORTIS, M.; BEYER, H. A. Calibration stability of the KODAK DCS420 and 460 cameras. **Videometrics V**. SPIE 3174 p. 94 - 105, 1997.

SITHOLE, G.; VOSSELMAN, G., Comparison of filtering algorithms. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. XXXIV/3/W13, Dresden, p. 71 - 78, 2003.

SKALLOUD, J.; CRAMER, M. SCHWARZ, K.P. Exterior orientation by direct measurement of camera position and attitude. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. XXXI/B3, p. 125 - 130, Viena, 1996.

SKALLOUD, J.; LEGAT, K. Theory and reality of direct georeferencing in national coordinates. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 63, p. 272 - 282, 2008.

VOSSELMAN, G. Slope based filtering of laser altimetry data. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. XXXIII, p. 935 - 942, Amsterdam, 2000.

WEGMANN, H.; HEIPKE, C.; JACOBSEN, K. Direct sensor orientation based on GPS network solutions. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. XXXV, p. 153 - 158, Istanbul, 2004.

WEHR, A.; LOHR, U. Airbone Laser Scanning - An introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 54, p. 68 - 82, 1999.

WOLF, P.R.; DEWITT, B.Q. **Elements of Photogrammetry with Applications in GIS**. Mc-Graw-Hill, 3. ed., 2000. 624 f.

WOLF, P.R. GHILANI, C.D. **Adjustment computations: statistics and least squares in surveying and GIS**. Wiley, 1997. 564 f.

YASTIKLI, N.; JACOBSEN K., Influence of system calibration on direct sensor orientation. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v. 5, p. 629 - 633, mai. 2005.

YASTIKLI, N.; TOTH, C.; BRZEZINSKA. In-situ camera and boresight calibration with LIDAR data. **The 5th International Symposium on mobile mapping technology**. Padua, 2007.

ANEXOS

ANEXO 01 - Exemplo de arquivo do sistema LIDAR

```

*****
POS OUTPUT Utility
Copyright (C) 1997-2004 by Applanix Corporation [May 27, 2004]
All rights reserved.
*****

*****
Parameter setup:
POSPROC SBET file: Q:\Perla\Calibraç"o\ALTM_2050\11150\LIDAR\IMU\Proc2\sbet_01.out
Camera mid-exposure event file: Q:\Perla\Calibraç"o\ALTM_2050\11150\Aerofotogrametria\Eventos_11150.dat
Event time shift: 0.000000 sec
*****

Photo ID file:
Photo ID file format: 2 Fields (Time, Photo ID) Format
Offset between PHOTO ID and EVENT file times: 0.000000 sec
Mapping frame datum: WGS84 : Mapping frame projection : TM;
central meridian = -51.000000 deg;
latitude of the grid origin = -0.000000 deg; grid scale factor = 0.999600;
false easting = 500000.000000 m; false northing = 1000000.000000 m;
Boresight values: tx = 0.0000 arc min, ty = 0.0000 arc min, tz = 0.0000 arc min.
Lever arm values: lx = -0.0350 m, ly = -0.2440 m, lz = 0.0550 m.
ID, TIME, DISTANCE, EASTING, NORTHING, ELLIPSOID HEIGHT, LATITUDE, LONGITUDE, ELLIPSOID HEIGHT, ROLL, PITCH, HEADING, EAST VELOCITY, NORTH VELOCITY, UP VELOCITY,
EAST SD, NORTH SD, HEIGHT SD, ROLL SD, PITCH SD, HEADING SD
(ID, time in Sec, distance in Meters, position in Meters, lat, long in Degrees, orientation angles and SD in Degrees, velocity in Meter/Sec, position SD in Meters)

F_001 151786.99074 104844.206 586593.263 7226294.591 2932.295 -25.07660718 -50.14136140 2932.295 0.661 -0.178 257.682 -67.590 -17.933 0.178 0.014 0.014 0.033 0.003 0.003 0.012
F_002 151796.73208 105524.761 585934.039 7226127.669 2933.130 -25.07815215 -50.14788711 2933.130 -1.674 -0.401 257.626 -67.571 -17.934 -0.066 0.014 0.014 0.033 0.003 0.003 0.012
F_003 151806.74193 106225.814 585258.651 7225941.843 2932.434 -25.07986845 -50.15457208 2932.434 -0.698 -0.416 256.237 -67.328 -19.752 -0.101 0.014 0.014 0.033 0.003 0.003 0.012
F_004 151816.73337 106927.191 584584.004 7225752.068 2932.232 -25.08162008 -50.16124965 2932.232 0.881 -0.265 257.146 -67.667 -18.631 0.083 0.014 0.014 0.033 0.003 0.003 0.011
F_005 151826.74346 107628.646 583905.360 7225576.813 2933.092 -25.08324053 -50.16796796 2933.092 -0.764 -0.198 258.144 -67.784 -17.584 0.006 0.014 0.014 0.033 0.003 0.003 0.011
F_006 151836.75407 108329.662 583229.341 7225393.567 2932.550 -25.08493267 -50.17465992 2932.550 -2.005 -0.356 255.974 -67.087 -20.200 -0.108 0.014 0.014 0.033 0.003 0.003 0.011
F_007 151846.74641 109030.282 582558.382 7225193.790 2932.336 -25.08677353 -50.18130092 2932.336 1.806 -0.407 256.509 -67.365 -19.491 -0.008 0.014 0.014 0.033 0.003 0.003 0.011
F_008 151856.73831 109731.088 581880.499 7225018.333 2932.843 -25.08839485 -50.18801223 2932.843 0.743 -0.156 258.890 -68.076 -16.692 0.188 0.014 0.014 0.033 0.003 0.003 0.010
F_009 151866.74871 110431.860 581199.335 7224856.089 2933.338 -25.08989675 -50.19475704 2933.338 -1.733 -0.284 258.390 -67.858 -17.206 -0.158 0.014 0.014 0.033 0.003 0.003 0.010
F_010 152128.11647 129922.176 581038.467 7224770.625 2933.010 -25.09067714 -50.19634718 2933.010 -3.912 0.229 78.046 76.253 17.439 0.048 0.014 0.014 0.032 0.003 0.003 0.009
F_011 152137.74784 130673.686 581764.768 7224960.694 2933.528 -25.08892161 -50.18915638 2933.528 -1.696 0.148 73.770 74.538 22.418 0.041 0.014 0.014 0.032 0.003 0.003 0.009
F_012 152147.75680 131452.502 582514.421 7225169.347 2933.122 -25.08699666 -50.18173536 2933.122 0.906 0.238 76.487 75.286 19.453 0.109 0.014 0.014 0.032 0.003 0.003 0.009
F_013 152157.74837 132227.178 583260.709 7225374.194 2934.194 -25.08510588 -50.17434772 2934.194 -3.675 0.215 72.453 73.539 23.993 -0.081 0.014 0.014 0.032 0.003 0.003 0.009
F_014 152167.75857 133001.013 583995.890 7225613.717 2934.441 -25.08290225 -50.16707256 2934.441 3.446 0.224 73.261 73.769 22.859 0.141 0.014 0.014 0.032 0.003 0.003 0.009
F_015 152177.74940 133772.237 584740.669 7225811.241 2935.353 -25.08107696 -50.15969992 2935.353 -0.394 0.163 76.725 74.885 18.680 0.040 0.014 0.014 0.032 0.003 0.003 0.009
F_016 152187.74183 134543.931 585487.445 7226003.233 2934.752 -25.07930117 -50.15230736 2934.752 -0.552 0.290 74.947 74.395 20.680 0.097 0.014 0.014 0.032 0.003 0.003 0.009
F_017 152197.75173 135316.022 586232.894 7226201.999 2935.041 -25.07746391 -50.14492861 2935.041 0.633 0.297 75.960 74.515 19.672 -0.019 0.014 0.014 0.032 0.003 0.003 0.009

```

APÊNDICES

APÊNDICE 01 - Análise de Tendência das Calibrações realizadas

O teste de t de *Student* foi realizado para verificar a existência de tendência no conjunto de dados analisado. A verificação foi realizada pela formulação das seguintes hipóteses:

$$\begin{aligned} H_0 : \mu &= \mu_0 \\ H_1 : \mu &\neq \mu_0 \end{aligned} \quad (28)$$

Sendo, neste caso, $\mu_0 = 0$. A hipótese nula, ou básica (H_0), pressupõe que a média populacional estimada (μ), é igual a μ_0 , ou seja, igual a zero. A hipótese alternativa (H_1) pressupõe que a média populacional estimada é diferente de μ_0 , diferente de zero. Os valores das médias populacionais estimadas foram calculados em função das estatísticas determinadas nas três componentes (X, Y e Z). A estimativa da média populacional, determinada pela equação 29, é feita através da média amostral (\bar{x}), do desvio padrão amostral (S), do tamanho da amostra (n) e da estatística tabelada ($t_{\alpha/2, gl}$).

$$\mu \leq \bar{x} + (t_{\alpha/2, gl}) \left(\frac{S}{\sqrt{n}} \right) \quad (29)$$

A estatística amostral calculada (t_{calc}) é dada pela equação 30:

$$t_{cal} = \frac{(\bar{x} - \mu_0)}{\frac{S}{\sqrt{n}}} \quad (30)$$

Como $\mu_0 = 0$ tem-se:

$$t_{cal} = \frac{\bar{x}}{\frac{S}{\sqrt{n}}} \quad (31)$$

A hipótese nula não será rejeitada ao nível de significância de α se o valor t tabelado for maior que o módulo da estatística amostral calculada (t_{calc}) (32):

$$|t_{cal}| < t_{\alpha/2, gl} \quad (32)$$

Na Tabela 98 são apresentados os resultados dos testes de tendência realizados para as calibrações aéreas baseadas no campo de prova.

TABELA 98- TESTES DE HIPÓTESE PARA VERIFICAÇÃO DE TENDÊNCIA NAS COMPONENTES X, Y E Z DAS CA 1,2,3 E 4

	X			Y			Z		
	Teste de Normalidade (p valor)	t _{cal}	t _{α/2, gl}	Teste de Normalidade (p valor)	t _{cal}	t _{α/2, gl}	Teste de Normalidade (p valor)	t _{cal}	t _{α/2, gl}
Ca1	0,209	-1,463	2,447	0,207	0,277	2,447	0,298	-1,392	2,447
Ca2	0,119	1,786	2,306	0,735	0,665	2,306	0,616	1,505	2,306
Ca3	0,057	0,205	2,447	0,674	0,033	2,447	0,516	-0,610	2,447
Ca4	0,159	0,499	2,306	0,291	0,992	2,306	0,896	0,883	2,306

Na Tabela 99 são apresentados os resultados dos testes de tendência realizados para as calibrações aéreas utilizando número mínimo de pontos.

TABELA 99 - TESTES DE HIPÓTESE PARA VERIFICAÇÃO DE TENDÊNCIA NAS COMPONENTES X, Y E Z DAS CA COM MÍNIMO DE PONTOS

	X			Y			Z		
	Teste de Normalidade (p valor)	t _{cal}	t _{α/2, gl}	Teste de Normalidade (p valor)	t _{cal}	t _{α/2, gl}	Teste de Normalidade (p valor)	t _{cal}	t _{α/2, gl}
Ca5	0,990	0,439	2,447	0,738	-0,434	2,447	0,970	-1,865	2,447
Ca6	0,010	2,457	2,447	0,214	-0,153	2,447	0,721	1,149	2,447

Teste de Wilcoxon para a componente X da CA6: p valor = **0,047**

O resultado corrobora com o teste t realizado, ou seja, H₀ foi rejeitada.

Na Tabela 100 são apresentados os resultados dos testes de tendência realizados para as calibrações aéreas utilizando pontos de apoio altimétrico do campo de prova.

TABELA 100 - TESTES DE HIPÓTESE PARA VERIFICAÇÃO DE TENDÊNCIA NAS COMPONENTES X, Y E Z DAS CA COM PONTOS DE APOIO ALTIMÉTRICO

	X			Y			Z		
	Teste de Normalidade (p valor)	t _{cal}	t _{α/2, gl}	Teste de Normalidade (p valor)	t _{cal}	t _{α/2, gl}	Teste de Normalidade (p valor)	t _{cal}	t _{α/2, gl}

Ca7	0,819	2,655	2,447	0,758	-1,888	2,447	0,556	-1,531	2,447
Ca8	0,985	0,234	2,447	0,614	-0,477	2,447	0,770	-2,237	2,447
Ca9	0,338	1,776	2,447	0,097	-0,130	2,447	0,529	-1,368	2,447

Na Tabela 101 são apresentados os resultados dos testes de tendência realizados para as calibrações em serviço.

TABELA 101 - TESTES DE HIPÓTESE PARA VERIFICAÇÃO DE TENDÊNCIA NAS COMPONENTES X, Y E Z DAS CS

	X			Y			Z		
	Teste de Normalidade (p valor)	t _{cal}	t _{α/2,gl}	Teste de Normalidade (p valor)	t _{cal}	t _{α/2,gl}	Teste de Normalidade (p valor)	t _{cal}	t _{α/2,gl}
Cs1	0,401	13,656	2,093	0,003	-7,523	2,093	0,214	-1,137	2,093
Cs2	0,005	3,875	2,101	0,006	-2,716	2,101	0,428	-1,174	2,101
Cs3	0,167	1,150	2,110	0,796	2,979	2,110	0,467	-2,057	2,110

- Teste de Wilcoxon para a componente Y da CS1 p valor = **1,907e-06**

O resultado corrobora com o teste t realizado, ou seja, H₀ foi rejeitada.

- Teste de Wilcoxon para a componente X da CS2 p valor = **2,098E-04**

O resultado corrobora com o teste t realizado, ou seja, H₀ foi rejeitada.

- Teste de Wilcoxon para a componente Y da CS2 p valor = **0,004**

O resultado corrobora com o teste t realizado, ou seja, H₀ foi rejeitada.

Na Tabela 102 são apresentados os resultados dos testes de tendência realizados para as calibrações aéreas empregando o bloco fotogramétrico de Telêmaco Borba.

TABELA 102 - TESTES DE HIPÓTESE PARA VERIFICAÇÃO DE TENDÊNCIA NAS COMPONENTES X, Y E Z DAS CA DO BLOCO DE TELÊMACO BORBA

	X			Y			Z		
	Teste de Normalidade (p valor)	t _{cal}	t _{α/2,gl}	Teste de Normalidade (p valor)	t _{cal}	t _{α/2,gl}	Teste de Normalidade (p valor)	t _{cal}	t _{α/2,gl}
CST	0,204	1,215	2,048	0,843	1,218	2,048	0,631	-1,206	2,048
CAT	0,996	0,500	2,048	0,809	0,715	2,048	0,715	-1,873	2,048